

RÉPUBLIQUE DE DJIBOUTI

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
ET DE LA PRODUCTION ANIMALE

PROJET ATAR

---



**RECHERCHE ET CARACTÉRISATION  
PÉDOLOGIQUE  
D'UN PÉRIMÈTRE D'IRRIGATION  
DANS LA PLAINE CÔTIÈRE  
DE DJIBOUTI**

M. RAUNET

Avril 1979

**I.R.A.T.**

INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES  
TROPICALES ET DES CULTURES VIVRIÈRES

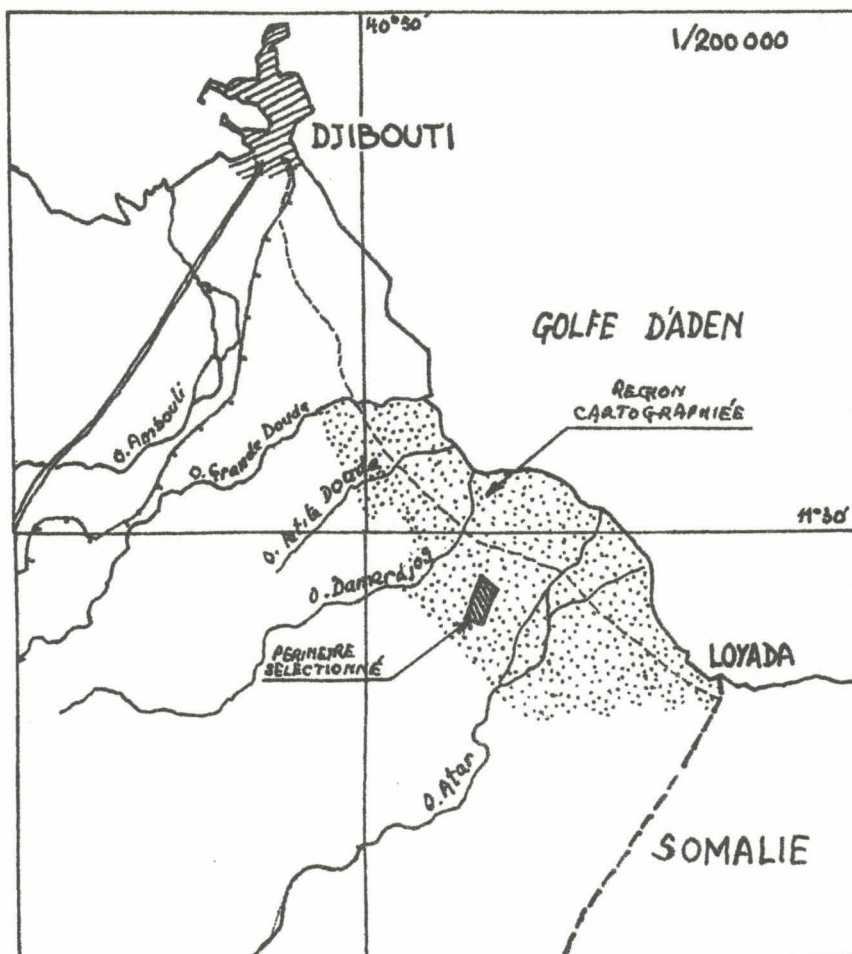
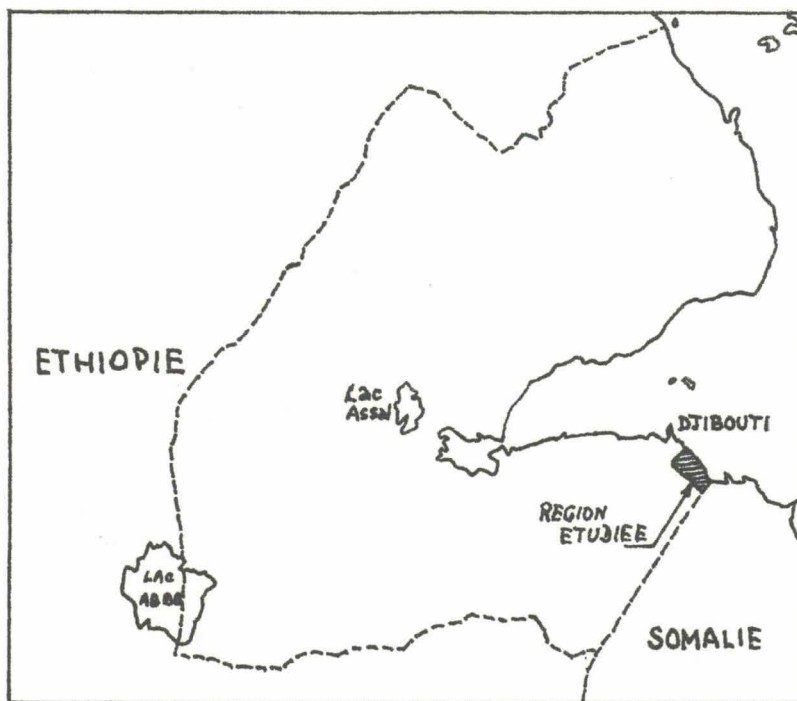
**PÉDOLOGIE**

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
<u>PREMIERE PARTIE : LE MILIEU NATUREL DE LA PLAINE COTIERE</u>	3
I.    CLIMATOLOGIE	
II.   APERCU GEOMORPHOLOGIQUE	5
III.  LES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES	7
III.1  LA ZONE DES BASALTES	7
III.2  LES SEDIMENTS MARINS	8
III.3  LES ALLUVIONS FLUVIATILES	12
3.1  Les alluvions anciennes	12
3.2  Les alluvions récentes et actuelles	13
. Les alluvions récentes	13
. Les alluvions actuelles	14
3.3  Les épandages colluvo-alluviaux actuels	15
III.4  LES SEDIMENTS FLUVIO-MARINS ET DELTAIQUES	16
III.5  LES FORMATIONS EOLIENNES	17
IV   HYDROLOGIE - HYDROGEOLOGIE	18
IV.1  LES EAUX DE SURFACE	18
1.1  La dynamique de l'Oued Atar	18
1.2  Les eaux de ruissellement dans la plaine cotière	19
IV.2  LES EAUX DE NAPPE	19
2.1  La nappe des sédiments cotiers	19
2.2  La nappe des basaltes	20
<u>DEUXIEME PARTIE : CARACTERISATION DU PERIMETRE RETENU</u>	23
I.    ETUDE DU MILIEU PHYSIQUE	23
I.1    LOCALISATION	23
I.2    PHYSIOGRAPHIE - ETAT DE SURFACE	23

I.3	REGIME HYDROLOGIQUE	24
I.4	LES SOLS	25
	4.1 Caractéristiques physiques	25
	4.2 Caractères analytiques	26
I.5	APPRECIATION SYNTHETIQUE	29
II.	MISE EN VALEUR DU PERIMETRE	30
II.1	AMELIORATION DE LA FERTILITE DU SOL	30
	1.1 Amélioration de l'horizon superficiel	30
	1.2 Fertilisation	31
II.2	AMENAGEMENTS	31
II.3	L'IRRIGATION	33

ANNEXES : DESCRIPTIONS ET ANALYSES DE SOLS





## INTRODUCTION

Cette étude pédologique (qui fait l'objet d'un contrat entre l'IRAT et le Ministère Français de la Coopération) est destinée à fournir des bases au projet d'irrigation d'un périmètre maraîcher d'une dizaine d'hectares (projet "Atar") dans la plaine cotière de Djibouti (entre l'Oued Grande Douba et la frontière Somalienne). Le périmètre sera irrigué à partir de la nappe phréatique contenue dans les basaltes de l'amont, constituant les bassins versants des oueds traversant la plaine. Cette nappe est destinée en priorité à compléter l'alimentation de Djibouti en eau potable. Une douzaine de forages reliés par une canalisation seront prochainement en exploitation et ils s'ajouteront aux forages déjà fonctionnels du bassin de l'Oued Ambouli. Le projet d'irrigation ne consommera qu'une très faible partie du débit exploitable de la nappe (moins de 1000 m<sup>3</sup>/jour pour un débit exploitable évalué à 40.000 m<sup>3</sup>).

Notre mission a consisté à sélectionner le meilleur emplacement possible pour le périmètre, compte tenu d'un certain nombre d'impératifs ou de contraintes. Pour cela nous avons inventorié le milieu naturel de la plaine cotière, en débordant largement l'aspect strictement pédologique qui s'avère insuffisant. Des facteurs limitants autres que ceux qui sont liés au sol peuvent en effet intervenir.

Le périmètre, une fois localisé et délimité, a été caractérisé plus en détail, et des propositions d'aménagement ont été faites.

La mission de terrain s'est déroulée entre le 2 et le 26 Mars 1979. La plus grosse partie du temps a été consacrée au projet "Atar". Une semaine a été passée à étudier sommairement les sols situés à proximité des forages du projet "Lotux" à l'intérieur du pays. Cette partie de la mission fait l'objet d'un rapport séparé de celui-ci.

Les considérations suivantes nous ont guidé pour proposer l'implantation du périmètre :

- la nécessité de retenir les sols les moins salés possibles, malgré l'imprégnation quasi-générale par le sel, des matériaux de la plaine cotière,
- l'utilisation d'eau d'irrigation de qualité médiocre, rendant rhédictoire ou en tout cas fort risqué le choix de sols limoneux ou argileux susceptibles de se saler davantage ou de s'alcaliser rapidement,
- la nécessité de situer le périmètre agricole en position pas trop éloignée par rapport aux basaltes où sera situé le forage, de façon à réduire le coût des aménagements,
- les contraintes d'ordre géométrique imposant le choix d'un bloc d'un seul tenant, d'une forme assez compacte, d'une superficie d'au moins 10 hectares et si possible 20 hectares afin d'assurer une extension éventuelle.



Pour diverses raisons les trois sites possibles proposés initialement, avant la reconnaissance morphopédologique, n'étaient pas compatibles avec les impératifs précédents :

. Le site de rive gauche de l'Oued Damerdjog, dominé par le massif basaltique du Tourka Damerdjog, est caractérisé par des sols limono-argileux assez fortement salés, difficilement lessivables. Il s'agit d'une contrainte rhédictoire, malgré les avantages qu'offrait le choix de cet emplacement, en particulier la protection contre les vents chauds d'été que constitue le massif rocheux.

. Le site du cône de déjection actuel de l'Oued Atar (alluvions actuelles sablo-caillouteuses), à l'aval immédiat du radier de la route Djibouti-Loyada, convient du point de vue sol (sols non salés, drainant facilement). Par contre, il présente des inconvénients majeurs : l'occupation foncière est importante, cette zone étant spécialement recherchée pour l'implantation des jardins, à cause de la présence d'une nappe d'eau douce proche de la surface, et de la nature sableuse favorable aux cultures maraîchères ; même en supposant l'expulsion des occupants actuels, cette zone est trop morcelée par les nombreux défluent de l'Oued Atar pour qu'on puisse y délimiter 10 hectares en un seul bloc de sols acceptables. D'autre part il existe des risques appréciables de destruction des aménagements par les plus fortes crues des défluent du cône de déjection de l'Oued . Enfin, l'éloignement de la ligne de forages (environ 3 km) obligerait à une longueur de canalisations importante et coûteuse.

. Le site de la rive droite de l'Oued Atar, à son débouché dans la plaine cotière, sur le cône de déjection ancien, offrait évidemment l'avantage d'être à proximité immédiate du forage E 24. Par contre les sols des alluvions anciennes sont excessivement limoneux, et leur drainage est insuffisant pour empêcher la salinisation secondaire et l'alcalisation qui seront consécutives à l'irrigation avec une eau de qualité chimique limite (C4S3). Les sols de cette terrasse sont très souvent à l'état naturel, fortement imprégnés de sels d'origine éolienne, ce qui prouve le danger qu'il y a à retenir cette zone, même si le sol prélevé (profil DJ 6 en annexe) ne montre pas une conductivité excessive ; il semble en effet peu représentatif compte tenu de ce que nous avons observé par ailleurs.

Les divers empêchements, interdisant le choix des emplacements précédents, nous ont amenés à inventorier l'ensemble de la plaine cotière, entre la Grande Douba et la frontière Somalienne. Nous avons donc localisé cartographiquement les formations superficielles, précisé leurs caractéristiques morpho-pédologiques ainsi que leurs contraintes spécifiques plus ou moins graves pour la mise en valeur envisagée.

Cette cartographie, qui n'était pas prévue à l'origine dans la mission pédologique, s'est avérée indispensable compte tenu (contrairement à ce qu'il semblait au premier abord), de l'hétérogénéité du milieu et à la faible étendue des zones non salées. La rareté des sites répondant aux exigences énoncées précédemment imposait une vision spatiale d'ensemble, permettant seule de proposer l'emplacement optimal.



## PREMIERE PARTIE

### LE MILIEU NATUREL DE LA PLAINE COTIERE

#### I. CLIMATOLOGIE

Nous sommes en milieu aride. Les données météorologiques assez complètes sont disponibles pour Djibouti-Ville et Djibouti-aéroport (Service de la Météorologie Nationale). Ces informations sont valables pour l'ensemble de la plaine cotière.

- La pluviométrie moyenne annuelle est de 130,5 mm (sur 60 ans), mais la variabilité est grande d'une année à une autre. Le maximum absolu enregistré est de 300 mm et le minimum absolu de 10,4 mm. Il pleut en petite quantité (10 à 20 mm par mois) d'Octobre à Avril, plus spécialement semble t'il en Novembre (23,7 mm) et en Mars (23,1 mm).

- La température moyenne annuelle est de 30°2. Les mois les plus chauds sont Juin - Juillet - Août et Septembre (moyenne des maxima = 40°4 en Juillet). En Juillet-Août la température maxima absolue peut dépasser 50°. Les mois les plus "frais" sont Décembre-Janvier et Février (moyenne des minima = 22°5 en Janvier).

- Les vents sont une composante importante du climat cotier de Djibouti. Ils sont quasi permanents. Les vents d'Est marins soufflent pendant la majeure partie de l'année, mais surtout d'Octobre à Avril. En Mai-Juin et en Septembre, ils tournent au NE. En été (Juillet-Août et à un degré moindre en Juin et Septembre) souffle le "Khasmin" (50 jours), vent d'Ouest violent, sec, très chaud et chargé de poussières. Il est difficilement supportable et rend l'agriculture pratiquement impossible (excepté les melons et les pastèques) ; il a un effet dépressif sur les cultures arbustives pérennes (bananier, cocotier, papayer ...).

Les vents soufflent essentiellement pendant la journée et tombent avec la nuit. La vitesse moyenne pendant l'année est de 6 noeuds (3 m/s) à 6 h, ce qui est modéré ; elle est de 12 noeuds (6 m/s) à midi ce qui correspond à un vent fort. L'action néfaste du vent se manifeste par les remaniements superficiels des matériaux et formations de champs de petites dunes et nebkas ; le vent d'Est humide et salé a également une incidence très forte sur la salinisation générale des matériaux de la plaine cotière.

Ces actions mécaniques et physico-chimiques, nécessiteront l'installation de brises-vents sur le périmètre maraîcher du projet.

- L'humidité de l'air est liée au régime des vents. Elle est la plus élevée d'Octobre à Mai (66 à 84 % d'humidité relative moyenne mesuelle) et minima en été, de Juin à Septembre, spécialement en Juillet-Août (45 à 47 %).

- L'évapotranspiration : en l'absence de données concernant l'évaporation du Bac classe A, la mieux adaptée pour apprécier les besoins des cultures, nous avons utilisé la méthode de BLANEY-CRIDDLE. La formule de BLANEY-CRIDDLE donne le "facteur de consommation" f défini par la formule :

$$f = p (0,46 t + 8,13) \text{ en mm/jour.}$$

(p) est le pourcentage journalier moyen des heures annuelles de lumière diurne.



DONNÉES CLIMATIQUES - VILLE DE DJIBOUTI

	JAN.	FEV.	MARS	AV.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	
PLUVIOMETRIE MOYENNE 1901/1962	11,2	12,0	23,1	11,6	4,6	0,4	5,7	8,4	5,7	10,5	23,7	12,9	130,5
HUMIDITE RELATIVE 6 H 1946/1956	83	83	88	83	74	63	52	77	75	74	76	80	76
HUMIDITE RELATIVE 12 H 1946/1956	70	68	78	75	64	55	43	60	55	64	66	70	69
HUMIDITE RELATIVE MOYENNE	70	71	72	84	71	62	45	47	62	66	70	68	65
TEMPERATURE MOYENNE DES MAXIMA ABSOLUS 1972/1973	36,0	36,4	38,6	40,8	42,6	47,4	51,2	49,2	44,3	40,2	38,0	37,1	
TEMPERATURE MOYENNE DES MINIMA ABSOLUS 1972/1973	20,2	19,5	22,4	22,9	25,5	27,0	28,6	28,7	26,9	23,7	20,4	20,8	
TEMPERATURE MOYENNE DES MAXIMA JOURNALIERS 1946/1956	28,7	29,1	30,5	31,8	34,1	38,7	40,4	39,8	36,6	33,3	31,2	29,6	33,7
TEMPERATURE MOYENNE DES MINIMA JOURNALIERS 1946/1956	22,5	23,4	24,8	26,3	28,1	30,4	30,5	29,8	29,6	26,9	24,7	23,2	26,7
TEMPERATURE MOYENNE 1946/1956	25,6	26,3	27,7	29,1	31,1	34,6	35,5	34,8	33,1	30,1	28,0	26,4	30,2
TEMPERATURE DU SOL A 20 CM A 12 H	32,1	32,3	34,0	36,0	37,9	38,5	39,3	39,2	39,9	38,2	34,7	33,1	
TEMPERATURE DU SOL A 50 CM A 12 H	33,3	32,9	34,1	35,9	37,6	38,2	38,9	39,3	39,5	38,3	35,7	34,2	
TEMPERATURE DU SOL A 100 CM A 12 H	34,3	33,5	34,0	34,8	36,8	37,0	37,5	38,1	38,3	38,1	36,3	35,4	
INSOLATION (n) h/j 1972/1973	6,5	7,7	8,9	10,4	9,6	9,2	8,6	8,9	9,3	9,5	10,1	8,2	8,9
DUREE ASTRONOMIQUE JOURNALIERE MOYENNE D'INSOLATION (N)	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5	
n/N	0,56	0,65	0,74	0,85	0,76	0,72	0,68	0,72	0,77	0,81	0,87	0,71	
% JOURNALIER MOYEN DES HEURES ANNUELLES DE LUMIERE DIURNE (P)	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,28
VITESSE DU VENT (m/s) A 8 H 1972/1973	3	3	3	2	2	2,5	3,5	2,5	2	2	2	3	
VITESSE DU VENT (m/s) A 12 H 1972/1973	5	5,5	5,5	5	5	4,5	6	4,5	4,5	5	5	5,5	
VITESSE DU VENT (m/s) A 18 H 1972/1973	5,5	4,5	4,5	3	4	4	4,5	3,5	3	2,5	3,5	4	
% DE VENTS DU NE A 12 H SUR 5 ANS	1,7	10,4	20	19,3	40,8	51,1	14,7	16,5	32,5	7,3	7,2	1,1	
% DE VENTS D'E A 12 H SUR 5 ANS	96,7	83,4	77	80	55,2	29,2	4,7	8,1	44,5	89,8	90,5	98,4	
% DE VENTS D'O A 12 H SUR 5 ANS	0,5				1,4	17,7	79,6	73,6	18,7	1			
EVAPORATION PICHE 1946/1956	126,3	150,0	140,9	154,9	107,2	216,1	487,5	515,5	329,6	224,5	185,9	178,0	2816
ETP BLANEY-CRIDDLE $f = p(0,46t+8,13)$ mm/j	5,1	5,4	5,7	6,0	6,3	7,0	7,1	6,8	6,6	5,9	5,5	5,3	6,09
ET <sub>0</sub> = ETP BLANEY-CRIDDLE CORRIGEE	5,1	5,5	5,9	6,3	6,6	7,7	8,0	7,3	7,1	6,0	5,6	5,4	6,39

Il est fonction de la latitude ( $11^{\circ}30'$  à Djibouti) et est donné par des tables.  
(t) est la température moyenne mensuelle en degrés celsius.

Ce facteur  $f$  a été ensuite corrigé en fonction : de la force du vent, de l'humidité relative et du rapport  $n/N$  (rapport entre les heures d'insolation réelles et la durée astronomique possible d'insolation). Des abaques permettent de passer de  $f$  à  $ET_0$  qui est l'évapotranspiration potentielle utilisée pour les prévisions des besoins des plantes, auquel on peut appliquer un coefficient  $K$  pour tenir compte de la nature de la plante et de son stade végétatif.

Pour Djibouti,  $ET_0$  est compris entre 5,1 et 6,6 mm pendant la période de cultures d'Octobre à Mai.



## II. APERCU GEOMORPHOLOGIQUE

La plaine cotière, située au Sud-Est de la ville de Djibouti, jusqu'au poste frontière de Loyada est constituée essentiellement de sédiments marins littoraux et fluvio-marins deltaïques pleistocènes, en partie recouverts ou emboîtés par des épandages continentaux fluviaux holocènes.

Cette plaine alluviale littorale est limitée à l'amont par des basaltes fissuraux d'âge fin-tertiaire à début pléistocène. La largeur du remblaiement détritique littoral est extrêmement variable ; minima au niveau de Loyada (400 mètres), elle atteint 4,6 km dans l'axe du cône de l'Oued Atar. Les oueds traversant la plaine et contribuant au rehaussement progressif au-dessus du niveau marin de la frange deltaïque, sont du Nord vers le Sud : l'Oued Ambouli, l'Oued Doua Wein (Grande Doua), l'Oued Doua Yar (Petite Doua), l'Oued Damerdjog, l'Oued Atar.

- Le plus important par la taille de son bassin versant est l'Oued Ambouli (630 km<sup>2</sup>) dont le cône de déjection très étendu s'appuie à l'aval sur un plateau de madrépores soulevé sur lequel est bâtie la ville de Djibouti. Ce cône est formé essentiellement de 3 nappes alluviales : l'une relativement ancienne (mais encore holocène) et limoneuse, à pavage superficiel caillouteux forme la plus grande partie de la surface du cône ; l'autre actuelle, sablo-caillouteuse (lits majeurs des défluent du cône) alimentée par les crues de l'Oued. Entre les deux, un palier alluvial intermédiaire récent, limono-sablo-caillouteux généralement non recouvert par les crues mais sapé sur ses berges, s'observe de façon discontinue. C'est sur cette terrasse que se trouvent le plus souvent les palmeraies et jardins irrigués du quartier d'Ambouli à Djibouti. Les cailloutis profonds des alluvions récentes et actuelles sont en effet le siège d'une nappe d'eau douce située à quelques mètres de profondeur, alimentée latéralement par les écoulements de l'Oued.

Les surfaces d'origine des niveaux alluviaux, ainsi que la dynamique de l'Oued ont été fortement perturbées par l'emprise humaine : nombreuses carrières et gravières, travaux de terrassement et constructions de la périphérie de Djibouti et de la zone de l'aérodrome, activités militaires, etc... La cartographie géomorphologique y est donc difficile et en fait de peu d'intérêt pour l'implantation d'un périmètre maraîcher de 10 hectares, peu envisageable dans cette partie de la plaine cotière trop occupée.

Nous avons étudié en détail et cartographié la plaine cotière située entre la Grande Doua et la frontière Somalienne, d'une superficie de 4500 hectares.

- La Grande Doua constitue en fait un défluent de l'Oued Ambouli. Les deux cours d'eau se séparent en amont de la plaine, dans les basaltes, au niveau d'une plaine de divagation alluviale formant un "delta intérieur". Le bassin versant propre de la Grande Doua est donc très peu étendu. Cet oued est surtout alimenté par une partie des eaux drainées par le bassin de l'Oued Ambouli et le "trop plein" des crues de celui-ci. Pendant la traversée de la plaine cotière la Grande Doua, après avoir recreusé la partie terminale du cône ancien de l'Oued Ambouli, s'emboîte, ainsi que sa petite terrasse récente, dans les sédiments marins sablo-coquilliers.



- La petite Douda quant à elle, n'a pratiquement pas de bassin versant sur les basaltes ; elle rassemble plusieurs axes de ruissellement prenant naissance sur la terrasse marine, et s'encastre dans celle-ci, avant d'atteindre la frange fluvio-marine littorale puis la mer.

- l'oued Damerdjog a un petit bassin puisqu'il draine seulement une trentaine de km<sup>2</sup> sur les basaltes. Son lit est enfoncé dans les sédiments marins de la plaine cotière, sans y avoir déposé de terrasse alluviale.

- l'oued Atar, enfin, dont le bassin versant est de 320 km<sup>2</sup>, a déposé comme l'oued Ambouli un vaste cône de déjection recouvrant les formations marines au débouché des basaltes ; ce cône forme une avancée convexe à terminaison deltaïque remblayant progressivement le milieu marin. Comme pour le cône de l'oued Ambouli, on trouve une extension considérable d'alluvions "anciennes" (bien qu'holocènes) argileuses à reg superficiel. Ce cône ancien est recreusé par les axes hydrographiques actuels. L'oued Atar en débouchant dans la plaine cotière se divise en effet en un certain nombre de défluent d'importances inégales, qui divergent en éventail. Les axes les plus virulents par leurs crues et leur largeur, sont situés à la bissectrice du cône, où ils forment des bras anastomosés dont l'ensemble s'élargit à l'aval en cône de déjection actuel sablo-caillouteux.

Les matériaux transportés par les oueds sédimentent après floculation ou non, en débouchant en mer ou en s'étalant sur la vase littorale pouvant être couverte par la marée ; ils remblaient progressivement un plateau madréporique vivant discontinu sub-affleurant en mer, bien visible sur les photos aériennes. La plaine cotière se termine donc par une zone mixte fluvio-marine, deltaïque qui forme une large bande de sédiments salés, sans aucune végétation, parcourue par des chenaux de marée ou les nombreux défluent terminaux des oueds.

A l'arrière de cette vase salée, se trouvent de larges dunes de quelques mètres de haut, riches en sables coquilliers, allongées parallèlement à la côte, et souvent piquetées d'acacias. Ces rides sont des restes de cordons littoraux bordant l'ancien rivage.

Les remaniements éoliens sont particulièrement actifs dans la partie aval de la plaine cotière du fait de la nature sableuse des alluvions actuelles et de la pulvérulence superficielle (texture soufflée) des sédiments salés aisément mobilisables par les vents permanents et assez forts tout au long de l'année. Les nombreux champs de petites dunes et de nebkas orientés E-W (vents dominants) témoignent de cette dynamique éolienne.



### III. LES UNITES MORPHO-PEDOLOGIQUES

#### III.1 LA ZONE DES BASALTES

Les basaltes qui sont situés à l'amont de la plaine cotière et qui l'enserrent constituent la terminaison orientale de coulées fissurales dont l'extension est considérable à Djibouti ; ils descendent en pente douce vers la mer, malgré les nombreux escarpements de faille. On y distingue plusieurs séries, interrompues par des périodes d'altération (paléosols interstratifiés), ou d'épandages détritiques (lentilles discontinues d'épaisseur variable) remplissant les parties basses des paléoreliefs. L'ensemble a une épaisseur de plusieurs centaines de mètres et a été disloqué en vastes panneaux. Cet épisode volcanique aurait débuté au mio-pliocène alors que les dernières coulées dateraient du début pleistocène. Il est probable que sa partie orientale, du moins sa base, s'est épanchée en milieu marin faisant ainsi reculer la côte.

Les basaltes sont du type alcalin. La plupart du temps ils présentent un facies massif, très dur, noir, légèrement bulleux, ce qui les distingue des basaltes "anciens" qui eux sont fortement altérés et assez friables avec des couleurs violacées leur donnant souvent l'apparence de tufs. Les coulées massives grossièrement prismées mais fortement diaclasées sont cependant alternées avec des coulées scoriacées et des niveaux argileux rouges (paléosols).

A l'amont de la plaine cotière, on trouve en général la succession suivante : en surface 1 à 3 mètres d'argile rouge, puis 10 à 12 mètres de basalte massif, surmontant 1 à 2 mètres d'argiles rouges ; puis 15 à 20 mètres de basaltes scoriacés constituant l'aquifère essentiel de la nappe cotière (voir plus loin) ; en-dessous on retrouve à nouveau des basaltes massifs diaclasés.

Le paléo-modèle de la surface basaltique (réseau de vallées hiérarchisées non fonctionnelles, glacis), ainsi que la présence de paléosols rouges et leur répartition, témoignent de conditions climatiques alternativement humides stables et semi-arides agressives, pendant le quaternaire.

Les *paléosols* qui couvrent de façon très irrégulière, mais assez généralisée, les basaltes, constituent une des caractéristiques essentielles les plus intéressantes de cet ensemble. Ces sols sont vivement colorés, ocre-rouge à brun-rouge, d'une épaisseur comprise entre 1 et 3 mètres, d'une texture argilo-limoneuse, homogène. La structure est toujours bien développée ; elle est polyédrique moyenne mais souvent très nettement prismatique. Ces sols sont toujours assez riches en calcaire actif diffus dans la majeure partie du profil, mais s'individualisant à la base en amas friables, nodules ou même parfois grosses concrétions ; on peut y observer localement un véritable encroûtement friable généralisé. Par ces caractères, ces sols rappellent donc davantage les sols rouges méditerranéens que les sols rouges tropicaux. En-dessous, on passe rapidement au basalte sain, par l'intermédiaire d'une zone d'altération en "pelures d'oignon", grisâtre ayant progressé par écailles concentriques à partir du réseau polygonal de fissures de la roche. La progression de cette altération est actuellement bloquée, les conditions d'humidité suffisantes n'existant plus pour l'entretenir.



Ces paléosols dont l'évolution géochimique est figée, subissent actuellement une imprégnation saline et surtout gypseuse, par les vents marins humides chargés de sel qui soufflent la majeure partie de l'année. Les faibles pluies (150 mm par an en moyenne) suffisent à la pénétration de ces sels jusqu'à 0,5 m de profondeur. De fréquents nodules cristallisés de gypse d'individualisent en effet à ce niveau, alors que près de la plaine cotière s'observent en surface des boursouflures poudreuses éparses de chlorure de sodium.

En surface les paléosols sont la plupart du temps couverts par un pavage de blocs anguleux de basalte non altéré et dont les parties "enracinées" dans le sol sont recouvertes d'un enduit calcaire blanc, provenant de la précipitation des bicarbonates des eaux de ruissellement. L'origine du pavage (reg) est la morphodynamique sous un climat semi-aride agressif (inactuel) ayant "balayé" et tronqué la couverture pédologique, dégageant et concentrant peu à peu en surface les blocs de basaltes qui ont résisté à l'argilification. Les particules fines sont éliminées par le ruissellement alors que les cailloux restent en place ; la déflation éolienne actuelle joue sans doute également un rôle actif dans la concentration relative superficielle des éléments grossiers.

La distribution spatiale actuelle des paléosols est très curieuse ; elle résulte de la dynamique passée de décapage en nappe et de façonnement en glacis de dénudation, du moins dans la partie cotière des nappes basaltiques. Elle se présente sous la forme de petites poches rapprochées, de l'ordre de 50 à 150 m de large, présentant des axes d'allongement perpendiculaires au sens de la pente du glacis, et dont le dessin d'ensemble, bien visible sur les photographies aériennes rappelle celui de la "brousse tigrée" d'Afrique Sahélienne où l'intensité du décapage, du "glaçage" et de la pénétration des eaux de ruissellement dans le sol, sont réglés par une dynamique ondulatoire.

En dehors de cette répartition en mosaïque, les paléosols rouges peuvent former aussi des plaines ou glacis de plus grande taille, à limites très irrégulières à affleurements épars de blocs du substratum inaltéré.

Du point de vue aptitude à l'irrigation, ces sols présentent de gros inconvénients du fait de leur teneur élevée en éléments fins (limons + argile) ; ils ont une dangereuse propension à piéger et concentrer les sels solubles contenus dans l'eau d'irrigation, surtout si cette eau est de qualité chimique limite comme c'est le cas semble t'il de la nappe phréatique contenue dans le substratum basaltique.

D'ailleurs à proximité de la plaine cotière, les sols sont déjà assez souvent salés par les embruns marins. L'élimination des sels existants et la prévention de la salinisation par l'irrigation nécessiteraient des doses de lessivage fortes et fréquentes, incompatibles avec la faible drainabilité du sol. L'utilisation de ces terres n'est donc pas à envisager.

### III.2 LES SEDIMENTS MARINS

Les diverses coupes observées dans les carrières situées entre la Grande et la Petite Doua, ainsi que dans les berges des oueds (Damerdjog et



Grande Doua) nous permettent d'établir la succession chronologique la plus fréquente des matériaux de la terrasse marine :

- Le *substratum basaltique* se trouve à une profondeur très variable, puisqu'il est recouvert en biseau par les sédiments marins, sous lesquels il semble présenter un pendage important vers le NE. D'autre part ces basaltes sont tectonisés et en partie effondrés le long d'une faille majeure soulignée dans la plaine par des collines résiduelles alignées, non recouvertes par le remblaiement marin. Les basaltes situés sous la plaine sont surmontés d'une *argile d'altération brunâtre* plus ou moins marmorisée, discontinue, de 0 à 3 m d'épaisseur, fortement structurée, reposant sur le basalte à altération concentrique à partir du réseau de diaclases.

Cela prouve l'existence d'une importante transgression marine recouvrant à une période du pléistocène des basaltes déjà profondément altérés (climat humide). Ces paléosols enterrés sont vraisemblablement contemporains des paléosols rouges sur les basaltes situés en arrière de la plaine cotière. Après la transgression marine, les paléosols recouverts ont perdu leur teinte vive initiale sous l'influence de l'hydromorphie.

- Au dessus des basaltes et de leur argile d'altération se trouve généralement un *cailloutis de base* d'environ 20 cm d'épaisseur constitué de galets de basalte légèrement aplatis, de 2 à 10 cm de diamètre, mêlés à des débris d'huîtres et de coquillages divers. Il s'agit d'un faciès de rivage assez agité dont le flux et le reflux de la houle ont façonné en galets les débris arrachés au substratum basaltique, en y mêlant des brisures de coquillages. Le long de l'avancée extrême du biseau de recouvrement des basaltes et matérialisant l'ancien rivage, ce niveau, qui est souvent affleurant est la plupart du temps, soudé en un grès (lumachelles) ou conglomérat de plage ("beach rock") extrêmement dur. Il forme alors une dalle de 10 à 50 cm d'épaisseur formée de galets, graviers, sables basaltiques et de débris de coquilles fortement liés par un ciment calcaire. Associé à ce grès de plage on trouve fréquemment des *incrustations de grosses huîtres* directement sur les blocs basaltiques.

- Au-dessus du cailloutis de base un épais *matériau sablo-coquillier* pouvant faire jusqu'à 15 mètres d'épaisseur, forme la partie la plus importante du remblaiement marin. Il peut commencer, spécialement à proximité de l'ancien rivage, ou en auréole autour des flots basaltiques (résidus d'effondrement), par un niveau de 2 à 3 mètres constitué exclusivement de *coquilles* de toutes sortes, peu brisées et non soudées. Puis on trouve 2 à 3 mètres de *sable très finement coquillier*, friable, parfois pulvérulent, de couleur beige à vert-pâle ; il ressemble à un sable micacé, mais les "pseudo-micas" sont en fait de minuscules plaquettes irrisées de nacre. Ce niveau semble être un faciès de décantation en eaux relativement calmes. Il est surmonté sur plusieurs mètres d'épaisseur, par un *sable coquillier plus grossier*, de teinte un peu plus claire, formé exclusivement de débris de tailles très variables de coquillages et de madrépores ; on y observe parfois une stratification entrecroisée et des lits plus grossiers de coquilles entières (faluns). Des niveaux discontinus de grésification différentielle peuvent s'observer. Ce matériau est marqué en surface par une argilification et une rubéfaction (paléosols).



- Dominant de quelques mètres, la terrasse marine (mais parfois à peine perceptible) et en aval de celle-ci s'observent des bombements grossièrement parallèles à la cote actuelle. Il s'agit de grès coquilliers à stratification entrecroisée, affleurant directement en surface (absence de paléosols). Ces rides représentent d'anciens hauts-fonds, construits par l'inversion du courant des marées. Entre les oueds Damerdjog et Atar, un dôme sans orientation préférentielle représente un reste de plateau madréporique, identique au substratum qui sous-tend la ville de Djibouti.

- Dans la zone de l'oued Damerdjog, en dessous du remblaiement sablo-coquillier qui forme l'essentiel de la plaine cotière et qui a un faciès franchement marin, bien que peu profond, où l'action des vagues et des courants alternés des marées se faisait nettement sentir, se trouve une argile sableuse marmorisée (gris-verdâtre, rougeâtre) fortement salée. Il s'agit d'une ancienne vase, qui correspondait à une sédimentation fine lagunaire ou fluvio-deltaïque, en eaux calmes, piégeant les sels marins. Cette argile sableuse renfermant quelques coquillages, s'observe au fond du large lit de l'oued Damerdjog ; ce lit suinte d'abondantes efflorescences blanches de chlorure de sodium libéré par la vase fossile.

Le milieu de sédimentation au début de la transgression était donc différent, d'un point à un autre de la plaine cotière actuelle : fluvio-lagunaire ou deltaïque calme à certains endroits où décantaient les matériaux fins, elle était plus turbulente (courants, flux et reflux des marées) à d'autres endroits avec sédimentation grossière. Il y a imbrication latérale entre ces divers faciès. Une étude détaillée par sondages, la détermination de la faune (mollusques et madrépores) permettraient d'établir plus précisément la paléogéographie cotière. Des datations au  $C^{14}$  (valables jusqu'à 40.000 ans) ou à l'U/Th (pour les périodes plus anciennes du pleistocène) pourraient donner l'âge de la transgression.

#### - Les paléosols

La terrasse de sables coquilliers montre une altération ancienne sur 2 à 3 mètres d'épaisseur, caractérisée par une argilification, une rubéfaction et une ségrégation du calcaire en profondeur :

. la couche superficielle (10 à 20 cm), friable et à texture généralement grossière, est un matériau de remaniement colluvial actuel en transit (ruissellement), riche en sable et petits graviers basaltiques et débris de coquilles lités. Elle repose avec une nette discontinuité sur le paléosol en place.

. le paléosol de couleur brun-rougeâtre (5 YR 4/4 à 4/6 à l'état humide), présente une texture limono-argileuse (30 % d'argile, 35 % de limon, 44 % de sable). La structure est polyédrique moyenne anguleuse à massive, et ne montre pas de fissuration ; la consistance est compacte.

Le sable coquillier originel est totalement argilifié, et on ne reconnaît plus de traces de coquilles, sauf à la base (2 à 3 mètres), dans la zone de transition, où s'observent de nombreux nodules et langues sablo-grése-



calcaires blancs résiduels, avant d'atteindre le substratum non altéré.

#### - Encroûtement calcaire

De haut en bas du profil, on observe un très net gradient de concentration du calcaire : jusque vers 60 cm de profondeur environ le profil est riche en calcaire à l'état diffus (8 % de calcaire actif, 20 % de calcaire total), puis commencent à apparaître des amas friables ou granules blanchâtres qui passent entre 2 et 3 m de profondeur à d'abondantes trainées et manchons verticaux grésocalcaires, non "digérés" par l'argilification. En dessous se trouve souvent une croûte grésocalcaire alvéolaire, discontinue, sous forme de gros rognons ruiniformes. Cette croûte caverneuse est généralement moulée dans sa partie supérieure par une croûte lamellaire plus lisse de 1 à 10 cm d'épaisseur, en plaquettes très dures. L'ensemble présente une disposition sub-horizontale mais montre des ondulations ; son épaisseur varie entre 20 et 50 cm.

Ces encroûtements qui rappellent fortement les croûtes calcaires des sols d'Afrique du Nord, sont inactuels. Ils sont les témoins, comme le sol rouge qui les surmonte, d'une période plus humide ; leur formation s'explique par la circulation hypodermique des eaux d'infiltration fortement chargées en bicarbonates et qui par précipitation ont cimenté le sable coquillier. Cette accumulation profonde est liée à la décarbonation partielle accompagnant la rubéfaction et l'argilification du matériau dans sa partie supérieure.

Un encroûtement préférentiel plus intense existe à l'amont des ruptures de pentes bordant les entailles de la terrasse marine ; à ces endroits, l'afflux des eaux d'écoulement hypodermique accélère la cimentation calcaire. L'érosion en nappe actuelle sur les flancs des petits oueds encastrés dans les sables coquilliers a eu pour résultats de décaper les paléosols puis de démanteler les plaquettes et les croûtes alvéolaires grésocalcaires qui jonchent la surface (franges plus claires sur les photographies aériennes).

#### - Imprégnation de sel et de gypse

L'ensemble de la plaine cotière est balayé pratiquement toute l'année par les vents marins humides et salés. Les sels sont alors piégés dans les sols ; les faibles pluies (150 mm par an) ne s'infiltrant pas à plus de 1 mètre de profondeur, et ne peuvent donc pas assurer un lessivage naturel. Au contraire la tranche supérieure des sols subit une imprégnation générale, et celle-ci, d'autant plus fortement que la texture est plus fine. Après une pluie, l'évaporation rapide ramène en surface une partie des sels infiltrés ; les boursoufflures brun-rougeâtre de chlorure de sodium cristallisé éclosent alors de façon généralisée. Leur consistance poudreuse favorise leur reprise par la déflation éolienne et leur dépôt plus en amont qui se sale ainsi loin à l'intérieur par relais successifs. Il y a donc une dynamique continue entre l'alimentation par les vents, la pénétration dans la tranche supérieure de sols, la remontée par évaporation et enfin la reprise à nouveau par le décapage éolien.

Les paléosols de la terrasse marine présentent jusqu'à au moins 1 m de profondeur, une conductibilité électrique toujours très élevée ( $\rho > 2000 \mu\text{mhos}$  dans l'extrait au 1/5), rhédbitoire pour la plupart des cultures. Comme nous l'avons déjà indiqué pour les sols sur basaltes, un lessivage artificiel sera



très difficile à obtenir compte tenu de la perméabilité insuffisante et de la teneur excessive en éléments fins.

La charge non négligeable en sels de l'eau qui sera utilisée pour l'irrigation (voir plus loin) aggrave le problème ; de plus elle peut rapidement aboutir à l'alcalisation du sol, c'est à dire la fixation excessive de sodium sur le complexe absorbant qui a pour conséquence la destruction de la structure et la prise en masse du sol. Pour ces raisons, nous déconseillons fortement l'utilisation de ces terres pour l'irrigation. Alors que le chlorure de sodium se manifeste visuellement surtout dans les 50 cm supérieurs (structure friable poudreuse), le gypse s'observe plutôt en-dessous de 60 cm sous la forme de granules, amas ou gros nodules cristallisés.

### III.3 LES ALLUVIONS FLUVIATILES

#### 3.1. Les alluvions anciennes

L'oued Ambouli et l'oued Atar ont déposé, vraisemblablement à l'holocène en climat semi-aride, de vastes cônes de déjection, recouvrant une partie des dépôts d'origine marine décrits précédemment.

Ces cônes pouvant atteindre 20 m d'épaisseur à l'amont, ne sont plus fonctionnels à l'heure actuelle, c'est à dire qu'ils ne sont plus alluvionnés par des épandages. Ils sont au contraire profondément surcreusés par les axes hydrographiques actuels, et disséqués en lanières et plateaux ondulés.

La surface topographique du cône de l'oued Atar descend vers la mer avec une pente moyenne de l'ordre de 0,7 %. Cette pente n'est pas régulière puisque le ruissellement et l'érosion ont, postérieurement à la mise en place du cône, refaçoné et décapé la surface primitive.

On reconnaît aisément les alluvions anciennes par le fait qu'elles sont généralement couvertes en surface d'un pavage caillouteux constitué de galets et blocs émoussés de toutes tailles (5 à 50 cm). Ce reg est cependant discontinu ; il est associé à des trainées et placages sableux, de remaniement superficiel par les eaux et le vent. Ces "gouttières de transit" concentrant le ruissellement, donc bénéficiant d'un régime hydrologique plus favorable, sont piquetées d'*Acacia* (*Acacia raddiana*), alors que le reg est dénudé (excepté quelques *Balanites* rabougris, grignotés par les chèvres).

Le matériau alluvial est assez homogène : sa couleur est brun-clair ; sa texture est essentiellement limoneuse (50 % de particules de 2 à 50 $\mu$ ) et on observe de rares lits de galets. Les éléments grossiers qui existaient dans la partie supérieure du matériau ont été concentrés en surface (reg d'accumulation relative) par décapage hydrique différentiel et déflation éolienne, des particules fines. Cette épaisse accumulation alluviale a pour origine le décapage, pendant une phase semi-aride agressive de l'holocène, des sols rouges épais qui couvraient alors le bassin versant basaltique. L'absence d'évolution pédologique notable sur les alluvions du cône, indique un passage progressif du climat semi-aride au climat aride actuel, avec formation du pavage superficiel. Sous le niveau limoneux qui peut faire 8-10 m d'épaisseur, se trouve un



"cailloutis de base" reposant sur les sables coquilliers ou les argiles sableuses d'origine marine.

Les sols : La partie supérieure des alluvions ne constitue pas un sol au sens pédogénétique du terme puisqu'elle ne se différencie pas de l'ensemble du matériau. Le profil possède les caractéristiques suivantes : couleur brune (7,5 YR 4/4 à 5/4 à l'état humide), texture limoneuse à limono-sableuse fine ; absence d'éléments grossiers ; structure polyédrique anguleuse moyenne nette ; agrégats relativement friables, mais matériau assez compact dans son ensemble. La teneur en calcaire est élevée (21 à 24 % de calcaire total, 5 à 8 % de calcaire actif) ; la plus grosse partie est répartie uniformément de façon diffuse, mais on observe souvent de petits amas friables et granules blancs. Le pH est très élevé, généralement compris entre 9 et 10, ce qui en relation étroite avec la teneur relative élevée en bicarbonates de la solution du sol (cf. profil DJ.6 en annexes).

Une caractéristique importante du matériau est sa fréquente imprégnation de chlorure de sodium. La surface du sol est souvent parsemée de boursouflures salines qui percent au travers du pavage caillouteux ; les coupes d'érosion montrent également une structure poudreuse due au sel. Comme nous l'avons déjà indiqué, ce sel est d'origine allochtone ; il s'agit d'apports éoliens (vents d'Est marins). Il imprègne de préférence les 50 centimètres supérieurs (limite de l'infiltration) des matériaux riches en argiles et limons ; les alluvions anciennes, tout comme la terrasse marine sont donc particulièrement sensibles à ce phénomène. Il en est de même concernant leur inaptitude à l'irrigation avec des eaux de qualité chimique médiocre ; ces sols demanderaient en effet un lessivage artificiel important qui ne pourrait probablement pas être assuré, compte tenu de leur perméabilité insuffisante. Il est alors à craindre une aggravation de la salinisation et la fixation d'ions sodium sur le complexe absorbant (alcalisation), rendant ainsi le sol encore plus imperméable et impénétrable aux racines.

### 3.2. Les alluvions récentes et actuelles

- Les alluvions récentes : (sans alluvionnement actuel) occupent la petite terrasse de part et d'autre de la Grande Douba. Ce palier alluvial de 50 à 150 mètres de large est très légèrement emboîté dans la plaine de remblaiement marin et domine de 1 à 3 mètres le lit actuel de l'oued ; il semble très rarement touché par les crues. Le matériau brun-rougeâtre clair est hétérogène, à texture variable mais limono-sableuse dominante, avec de nombreuses intercalations de cailloutis. Le sol est filtrant, friable, assez riche en calcaire. Il est généralement peu ou pas salé. Ces sols conviennent donc bien à l'irrigation. Ils sont déjà en grande partie occupés par des jardins, c'est pourquoi il est difficile d'envisager l'implantation du périmètre maraîcher du projet sur cette zone.

L'oued Damerdjog, contrairement à la Grande Douba n'est pas bordé par une terrasse importante. Celle-ci, si elle existait, a été décapée par l'érosion assez active à cet endroit.



- Les alluvions actuelles : sont encore alimentées par des crues ou épandages plus calmes sporadiques. Dans la zone cartographiée, on les trouve essentiellement sur le cône de déjection actuel de l'oued Atar et sur les épandages de ses défluent latéraux.

. Le cône actuel de l'oued Atar : à sa sortie des basaltes encaissants, l'oued Atar se divise en plusieurs lits principaux qui s'encastrent dans le cône ancien déblayé. Ces lits anastomosés divergent plus en aval, puis atteignent la mer formant une zone fluvio-deltaïque ; ils sont séparés par de nombreuses langues caillouteuses, effilées, recouvertes et engravées par les crues. Un peu plus bas, ainsi qu'en position latérale, cette terrasse inondable devient davantage à tendance sableuse.

Ce cône actuel (terrasses recouvertes par les crues, et lits anastomosés) peut être considéré comme le lit majeur très élargi de l'oued. Il est situé à peu près à la bissectrice du cône ancien et canalise la plus grosse partie des eaux débouchant dans la plaine au niveau du piton du Goumbourta Atar. Une partie moins importante, lors des grosses crues, alimente les 2 défluent latéraux.

Les alluvions exclusivement caillouteuses du cône : sont composées de plusieurs mètres de blocs et galets de basalte de toutes tailles à matrice sableuse très peu abondante. Elles sont couvertes, malgré tout, par une végétation d'Acacias relativement fournie, du fait d'un régime hydrique plus favorable (nappe d'inféro-flux). Les lambeaux de terrasse dominant de moins de 1,50 m les lits mineurs. Lors des débordement de crue, ils sont soumis à une dynamique brutale des eaux avec apports et transit de gros blocs.

Cette zone est donc tout à fait rhédibitoire pour l'installation d'un périmètre d'irrigation.

Les alluvions sablo-caillouteuses du cône : sont plus intéressantes : du point de vue sol elles forment un support acceptable ; on y trouve une alternance très hétérogène de niveaux sableux très friables et filtrants et de niveaux caillouteux ; de rares lentilles limoneuses s'y intercalent ; ces sols sont généralement peu salés ; leur texture grossière et leur submersion naturelle sporadique favorisent le lessivage des sels d'apport éolien.

De nombreux petits maraichers occupent cette zone, exploitant la nappe d'eau douce sous-jacente localisée dans les cailloutis. Il semble néanmoins que les crues constituent une menace constante ; la densité d'occupation des terres, leur morcellement (nombreux lits), l'éloignement de la ligne de forage, et les dangers de destruction des installations par les crues ne nous permettent pas de proposer raisonnablement cette zone pour implanter le périmètre d'irrigation.

Il demeure d'autre part une incertitude sur les risques de remontées salines du fait d'infiltrations latérales d'eau marine. La zone fluvio-deltaïque parcourue par des chenaux remontés par la marée est en effet proche.



. Les défluent latéraux de l'oued Atar : l'oued Las Dawwao défluent de rive droite n'a pratiquement pas remblayé ; il est encastré dans le cône ancien, puis dans la terrasse marine. Seul le défluent de rive gauche, se dirigeant vers Damerdjog, a déposé, et dépose encore actuellement des matériaux. Après avoir été encastré dans la terrasse holocène, le défluent, auquel s'ajoutent d'autres axes de ruissellement, prenant naissance sur cette même terrasse, viennent déverser leur alluvions sableuses dans une large zone d'épandage, piquetée d'Acacias. Le matériau lité, non salé, est exclusivement sableux (sable basaltique) sur 50 à 100 cm d'épaisseur, très friable et filtrant ; il repose sur un niveau alluvial récent plus limoneux non salé en amont, mais qui le devient progressivement vers l'aval.

Cette zone d'épandage entre en coalescence sur sa "rive" gauche avec une autre bande d'épandage déposée par de petits oueds prenant naissance sur les basaltes et indépendants de l'oued Atar lui-même. L'épaisseur des alluvions sableuses y est cependant plus faible (20 à 50 cm) ; celles-ci recouvrent en biseau le paléosol argileux de la terrasse marine, qui forme alors un niveau imperméable bloquant le lessivage des sels solubles, lors des inondations (boursofflures salines en surface). Cette bande est donc nettement moins intéressante que la première qui présente de nombreux avantages : salinité initiale nulle (lessivage naturel par les épandages), sols sableux à faible risque de rétention des sels de l'eau d'irrigation et à lessivage rapide, pas de risques d'alcalisation. Par contre si l'on choisit cette zone, ce que nous proposons, des aménagements contre les crues (peu violentes) seront sans doute nécessaires (voir plus loin).

### 3.3. Les épandages colluvo-alluviaux actuels

Ces matériaux ne rentrent pas strictement dans les alluvions, car avant leur dépôt, ils sont transportés sur une faible distance. On n'y observe pas de litation alluviale ni de lits hydrographiques nets. Nous avons distingué deux types d'épandages :

#### - Les épandages sableux des axes de transit du cône ancien

Sur la surface ondulée du cône de déjection holocène, se trouvent des gouttières d'accumulation et de transit de matériaux sableux, issus du décapage des parties plus hautes recouvertes d'un reg. Ces axes prennent naissance à la surface du cône et n'ont donc pas de relation avec la dynamique de l'oued Atar. Ils peuvent cependant rejoindre les alluvions sableuses de l'oued lui-même ou de ses défluent, et alors la limite entre les 2 matériaux est difficile à établir d'autant plus qu'ils sont tous les deux occupés par une végétation plus fournie d'Acacias.

Le matériau colluvo-alluvial est sableux (sable grossier basaltique) et ne présente généralement pas de litation. Son épaisseur est comprise entre 20 et 80 cm. Il repose sur un niveau argileux ou limoneux plus compact, bloquant le lessivage naturel des sels éoliens lors des écoulements ; ce sel peut alors remonter par évaporation et se manifester par des cristaux superficiels. Ces zones présentent donc moins d'intérêt pour l'irrigation, que les alluvions sableuses des défluent décrites précédemment. D'autre part leur extension est souvent trop limitée et leur forme trop étroite pour y envisager



l'implantation d'un périmètre.

- Les épandages argileux sur la terrasse marine

Cette unité est située entre l'Oued Damerdjog et la Petite Doua. Elle est en totale continuité topographique avec la terrasse marine. Les épandages argileux sont issus de l'érosion des paléosols rouges sur basaltes à l'amont du "Tourka Damerdjog". Ils s'étalent en une bande plus rouge d'environ 400 mètres de large, et recouvrent sur 20 à 60 cm d'épaisseur les paléosols brun-rouges de la terrasse marine. Les deux matériaux sont donc assez semblables. Cette zone se reconnaît par sa teinte plus rouge et la densité plus importante d'Acacias, siège d'un régime hydrique plus favorable. Des boursoflures poudreuses de sels sont très fréquentes en surface. En effet les eaux passent sans provoquer aucun lessivage profond comme sur les alluvions sableuses. Les conclusions concernant l'inaptitude à l'irrigation de ces sols sont les mêmes que pour la terrasse marine et pour les mêmes raisons.

### III.4 LES SEDIMENTS FLUVIO-MARINS ET DELTAIQUES

Les alluvions qui arrivent en mer sédimentent ou flocculent en faisant peu à peu reculer le rivage. Il s'est formée une large bande vaseuse ("slikke") pouvant atteindre 1 km de large, parcourue par des chenaux de marée et les défluent terminaux des oueds larges et peu enfoncés. Ceux-ci fonctionnent à double sens, car ils sont remontés par la marée.

La vase est submergée sporadiquement par les crues des oueds et régulièrement par les fortes marées.

A l'état exondé cette plage vaseuse est complètement dénudée et stérile. Il n'y a qu'à l'embouchure de l'Oued Damerdjog que nous avons pu observer quelques palétuviers (*Avicennia* et *Rhizophora*). Elle est caractérisée par de très nombreuses efflorescences blanches de NaCl formant une petite croûte durcie. Ces plages blanches sont associées à des zones de vase humide flocculée et glissante boursoflées de sel, de couleur brun-orangé et à des plages de vase durcies en croûtes feuilletées brunes ; on n'observe jamais de fentes de retrait, l'argile sableuse sodique formant un milieu totalement fermé.

Cette zone est soumise à une intense déflation éolienne (vents d'Est prédominants) dont les sédiments salés pulvérulents en surface offrent une prise facile.

A l'arrière de cette vase actuelle terminale se trouve une frange sub-littorale fluvio-deltaïque qui n'est plus fonctionnelle actuellement, car la marée ne l'atteint plus. Elle correspond à peu près à la bande comprise entre les côtes 2 et 4 mètres. Quelques arbustes (*Acacia raddiana*, *Balanites*) peuvent y pousser. Cette ancienne vase argilo-sableuse, souvent riche en coquilles est cependant encore fortement salée comme en témoignent les fréquentes efflorescences blanches. Cette zone passe graduellement en amont sans aucune rupture de pente aux matériaux sablo-coquilliers ou aux alluvions actuelles de l'Oued Atar.

### III.5 LES FORMATIONS EOLIENNES

Deux catégories de dunes existent à l'amont ou au sein même de la frange littorale fluvio-marine :

- Les grandes dunes : elles forment des rides ou bombements allongés dans une direction sub-parallèle à la cote actuelle, souvent piquetées d'Acacias. Leur largeur varie entre 50 et 200 mètres et elles dominant de 2 à 5 mètres la plage vaseuse actuelle sur laquelle elles sont posées (en position légèrement amont toutefois). Ces dunes semblent représenter d'anciens cordons ou hauts-fonds sableux ("barre") construits par la dynamique de la houle, des marées et des courants, avant le remblaiement et l'exhaussement deltaïque. Ces dômes sont essentiellement à base de sables coquilliers et de particules madréporiques localement grésifiés en profondeur ; leur couleur est jaunâtre.

Nous les avons rangés dans les formations éoliennes car ce matériau subit actuellement un important remaniement par le vent, mais dans une direction E-W, donc un peu différente de celle des anciens cordons.

On n'observe aucune évolution pédologique ; le matériau n'est généralement pas salé ; la dynamique éolienne constante contrarie l'accumulation des sels.

- Les champs de petites dunes et de "nebkas" : Ces formes typiquement éoliennes occupent généralement les zones situées immédiatement à l'arrière des sédiments fluvio-deltaïques. Leur matériau constitutif est en très grande partie du sable basaltique, issu de la déflation éolienne des basaltes ou alluvions fluviaux situés en amont.

Les accumulations forment des petites buttes de moins de 2 mètres de haut (généralement non jointives) et des monticules aux pieds des arbustes (nebkas).



#### IV. HYDROLOGIE - HYDROGEOLOGIE

##### IV.1 LES EAUX DE SURFACE

###### 1.1. LA DYNAMIQUE DE L'OUED ATAR

Les écoulements de l'oued Atar, sont pratiquement inconnus du point de vue quantitatif, en particulier les fréquences et débits des crues. Le bassin versant de l'oued Atar fait 320 km<sup>2</sup>. Le coefficient d'infiltration sur les basaltes est estimé à 10 %. En l'absence de mesures, des évaluations empiriques des débits de crues et de leur fréquence, pourraient être faites à partir des caractéristiques géométriques du bassin (pentes, formes), des coefficients de ruissellement, et de l'analyse fréquentielle des pluies ; il en est de même pour l'activité érosive. Les études et mesures faites sur le bassin de l'oued Ambouli, pourront en partie être extrapolées à l'oued Atar. Il semble que l'on ait, comme pour l'oued Ambouli, 3 à 4 grosses crues annuelles. Aux dires des jardiniers, cultivant des légumes sur les berges des divers bras fonctionnels de l'oued, de part et d'autre de la piste Djibouti-Loyada au niveau des radiers, la puissance du courant des eaux qui débordent de leurs lits est parfois catastrophique ; des jardins ont été balayés et des puits, colmatés par l'engravement, ont été abandonnés. Nous sommes en effet ici dans l'axe du cône de déjection actuel de l'oued où les eaux débouchent brusquement (effet de chasse d'eau) après avoir été canalisées pendant leur traversée du cône ancien. L'oued se divise et s'étale alors en de nombreux bras anastomosés puis divergents, séparés par des lanières effilées faisant partie du lit majeur régulièrement submergé par les crues ; malgré la présence d'assez nombreux Acacias en amont des radiers, ce lit majeur est constitué exclusivement de gros blocs et galets basaltiques qui témoignent de la violence de certaines crues. L'aval du cône actuel, de l'autre côté des radiers, est actuellement davantage alluvionné par du sable que par des blocs qui eux, se déposent les premiers, en amont. C'est sur cette "terrasse" sableuse submersible que sont situés les jardins

En dehors des axes centraux principaux (bissectrice du cône) deux défluent moins importants divergent au débouché de l'oued Atar dans la plaine cotière, de chaque côté du cône de déjection : l'un sur la rive gauche, en direction de Damerdjog, l'autre sur la rive droite (oued Las Dawwao). Celui de gauche, après avoir été canalisé dans les matériaux du cône ancien, s'étale dans sa partie aval où il constitue alors une zone d'épandage de crues, assez large (300 mètres), à alluvions sableuses.

Cette zone nous intéresse particulièrement car les eaux d'inondation sans doute pluriannuelles, ne sont pas assez violentes pour constituer une contrainte rhédictoire au maintien des cultures et du réseau d'irrigation. Cette dynamique hydrologique sur de telles alluvions sableuses et filtrantes, en assurant un lessivage régulier, a empêché les accumulations de sels d'origine éolienne (vents marins) telles qu'on les observe ailleurs dans la plaine cotière. Pour cette raison nous proposerons de situer le périmètre d'irrigation à cet endroit. Des aménagements (relativement peu coûteux) semblent cependant nécessaires contre les eaux d'épandage. Plusieurs solutions sont envisageables (voir



plus loin) : soit fermer tout à fait en amont, l'alimentation du défluent par les crues de l'oued Atar, soit dériver les eaux par une digue, avant leur étalement sur le périmètre.

## I.2. LES EAUX DE RUISSELLEMENT DANS LA PLAINE COTIERE

Les eaux de pluies qui ruissellent sur la terrasse marine se concentrent sur les flancs des oueds encastrés dans la plaine et y provoquent une érosion en nappe ou ravinante importante. De part et d'autre de l'oued Damerdjog, de la Grande et de la Petite Douda se trouve une bande érodée de 50 à 200 mètres de large. Les paléosols brun-rouge y sont décapés, laissant affleurer le sable coquillier et des débris de plaquettes grésocalcaires. L'afflux des eaux de ruissellement à ces endroits a également pour conséquence de lessiver latéralement les sels solubles au fur et à mesure de leur dépôt ; les boursoflures salines superficielles, y sont en effet moins nombreuses. Sur la terrasse marine non érodée, de larges axes de ruissellement (5 à 50 m de large), sont néanmoins visibles ; ils sont très peu encastrés (5 à 20 cm). Le déplacement fréquent de ces bandes de ruissellement assure un "balayage" par à coups, remaniant la surface de la terrasse dans les 10 à 20 cm supérieurs ; cette couche représente une "couche de transit" mixte (sables basaltiques en provenance de l'amont, et débris de coquilles de la terrasse marine).

Dans le sol, le bilan hydrique est nettement en faveur de l'évaporation. Les eaux de pluies ne pénètrent généralement pas à plus de 50 cm de profondeur sur les sols non sableux. Il s'en suit que les sels apportés par les vents s'accumulent progressivement dans la couche supérieure des matériaux.

## IV.2 LES EAUX DE NAPPE

### 2.1. NAPPES DES SEDIMENTS COTIERS

#### a) Les sédiments marins

Les sables coquilliers renferment une nappe dont le niveau piézométrique se situe vers 3 à 10 mètres. Cette eau est toujours salée en profondeur, bien au delà des limites de potabilité et d'utilisation agricole (taux de NaCl supérieur à 1g/l). Elle imprègne en effet un matériau marin ou fluviomarain qui possède une salinité résiduelle importante ; d'autre part, il est fort probable que cette salinité soit entretenue par des infiltrations latérales d'eau marine.

Dans sa partie supérieure, cette nappe cotière peut être alimentée latéralement en eau douce par la nappe phréatique où les infiltrations issues des basaltes qui constituent les bassins versants. Cette influence est très variable suivant les endroits. Elle semble dépendre de la dénivellation par rapport à la plaine, des basaltes dominants, et de la distance à laquelle on se trouve, au pied de ceux-ci. Ainsi, la bande cotière située entre l'oued Las Dawwao et la frontière Somalienne, est alimentée en eaux douces dont un flux appréciable se déverse en mer. Les habitants de Loyada puisent de l'eau potable



en bordure même du rivage. Le volant exploitable de cette eau douce est cependant faible. Par contre, les puits creusés dans les sédiments marins, entre la Grande Douda et l'oued Damerdjog, ont toujours donné de l'eau salée, sauf quelquefois en bordure immédiate des oueds eux-mêmes ou de leurs défluent, où la nappe est adoucie par l'infiltration latérale des eaux d'écoulement sporadique.

#### b) Les alluvions fluviales

- Les alluvions "anciennes" riches en limons de faible porosité ne sont généralement pas aquifères sauf peut être dans les "cailloutis de base" reposant sur le niveau marin, à au moins une dizaine de mètres de profondeur.

Lorsque les puits ou les forages creusés dans la partie aval des alluvions anciennes, atteignent la nappe, cela signifie que l'on a atteint le "substratum" fluvio-marin qui lui, est plus aquifère, mais salé.

- Les alluvions actuelles ou récentes sont les seuls matériaux de la plaine cotière à contenir une nappe non ou faiblement salée. La qualité chimique est bonne puisque le taux de NaCl est compris entre 0,10 et 0,35g/l (d'après études BCEOM - 1961). Les nappes les plus intéressantes sont situées dans les sables et cailloutis du cône de déjection actuel de l'oued Atar et sous la terrasse récente de la Grande Douda. La plupart des puits et jardins sont d'ailleurs implantés dans cette zone, en dépit des risques de crues ; la nappe est atteinte à une profondeur très variable (2 à 5 mètres) qui est fonction de la proximité du lit de l'oued et de la granulométrie du matériau alluvial. Il est probable en fait qu'il s'agisse de lentilles aquifères discontinues, situées à des niveaux différents, plutôt qu'une nappe continue. L'alimentation se fait par infiltration des écoulements et sous écoulements des oueds, et par leurs débordements. Si le débit des puits est généralement suffisant pour irriguer de petits jardins, cette nappe n'est pas envisageable pour de grands périmètres comme celui qui est prévu pour le projet. Compte tenu de l'irrégularité de l'alimentation, un pompage excessif risque d'atteindre le niveau salé sous-jacent, ou de provoquer un afflux latéral de la nappe salée, et ceci d'autant plus que l'on se rapproche de la mer.

### 2.2. LA NAPPE DES BASALTES

Les basaltes plio-pléistocènes constituant les bassins versants des oueds cotiers (Ambouli-Douda et Damerdjog-Atar), forment un aquifère très intéressant. Les niveaux aquifères les plus favorables sont les couches de basalte scoriacé. Le toit de la nappe est d'autant plus proche de la surface du sol que l'on se trouve plus loin de la mer. Les forages qui ont été implantés pour l'alimentation de Djibouti en eau potable, situés à 3-5 km du rivage, atteignent la surface piézométrique à 20-25 mètres de profondeur. La nappe sera exploitée dans une couche de basaltes scoriacés de 15 à 20 mètres d'épaisseur, plus ou moins en charge sous une couche d'altération argileuse rouge (paléosols) de 1 à 2 mètres, surmontée elle-même de 10-12 mètres de basalte massif, non aquifère.



Les forages d'exploitation de la Régie des Eaux ont 12 pouces de diamètre, sont tubés sur 9.5/8 pouces et crépinés dans la zone de pompage. Leur débit est compris entre 50 et 100 m<sup>3</sup>/h correspondant à un rabattement de 1 à 1,50 mètre.

La profondeur de pompage ne descendra jamais en dessous de la cote zéro afin de diminuer les risques de remontée d'eau salée.

- Débit de la nappe : On est réduit à des hypothèses puisque à notre connaissance aucune mesure de ruissellement n'a été faite sur le bassin. En admettant, de façon très empirique un coefficient d'infiltration des eaux pluviales,  $I = 10\%$ , et en admettant que toute l'eau infiltrée sur le bassin s'écoule vers la mer, le volume d'eau qui alimente annuellement la nappe est donné par la formule  $Q = P \times S \times I$  ( $P$  étant la pluviométrie annuelle prise égale à 150 mm,  $S$  la superficie du bassin, et  $I$  le coefficient d'infiltration), ce qui donne :

. Bassin Atar-Damerdjog (350 km<sup>2</sup>)

$$Q = P \times S \times I = 0,150 \times 350.10^6 \times 0,10 = 5,25.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

soit 14.300 m<sup>3</sup>/jour.

. Bassin Ambouli-Douda (630 km<sup>2</sup>)

$$Q = P \times S \times I = 0,150 \times 630.10^6 \times 0,10 = 9,45.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

soit 25.900 m<sup>3</sup>/jour.

Le débit maximum exploitable de la nappe des bassins basaltiques cotiers peut donc être évalué à 40.000 m<sup>3</sup>/jour.

Les intervalles entre forages (600 à 1000 mètres) ainsi que les débits de pompage envisagés, ont été déterminés en fonction de ces estimations.

Les besoins des cultures maraichères (voir plus loin) ne dépassent pas 100 m<sup>3</sup>/jour/ha, soit 1000 m<sup>3</sup>/jour si le périmètre atteint la dimension de 10 hectares. C'est donc peu, par rapport au volant disponible, dont la très grosse partie est destinée à la ville de Djibouti.

#### - Qualité chimique des eaux

Voici les résultats d'une analyse d'eau, prélevés le 24.10.75 dans le forage E 18 (voir carte), réalisée par l'E.R.H. de Nancy :

Résidus sec Mg/l	$\rho$ µmhos/cm	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	$\Sigma$ anions	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>++</sup>	$\Sigma$ cations
1966	2755	7,5	210	116	825	23	55		91	52	450	22,5	0,06	
			3,45	2,42	23,24	0,37		29,48	4,55	4,27	19,57	0,58		28,97

Cette eau présente donc une assez forte minéralisation. Il y a une forte teneur en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  largement dominante sur les autres éléments :

$\text{Na} \gg \text{Ca} > \text{Mg} \gg \text{K}$

$\text{Cl} \gg \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$

Par rapport à l'eau de mer, la répartition relative des ions est différente : le calcium domine légèrement sur le magnésium, et les bicarbonates dominent sur les sulfates.

La teneur en  $\text{NaCl}$  dépasse le seuil de potabilité généralement admis (1,17 g/l). La teneur en chlorure de 23 me/l peut représenter un danger pour certaines plantes.

Les risques d'action néfaste du sodium de l'eau d'irrigation, sur le sol (alcalisation par fixation préférentielle du sodium sur le complexe absorbant, pente de la structure, compaction ...) est donné par la formule de GAPON, ou rapport d'absorption du sodium  $\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$

les ions étant exprimés en me/litre.

L'eau analysée précédemment a un SAR de 9,31.

Dans le diagramme du Laboratoire de Riverside (U.S.A.) tenant compte de la conductibilité et du SAR, cette eau appartient à la classe  $\text{C}_4\text{S}_3$  ; une telle eau est considérée comme dangereuse sur les sols peu drainants, où le lessivage insuffisant favorise la concentration du sel toxique pour les plantes et néfaste pour les propriétés physiques du sol.

Il semble donc, provisoirement (en attendant les résultats des analyses d'autres forages) que la qualité chimique de l'eau soit limite pour l'irrigation. Cela impose l'élimination automatique des sols riches en éléments fins (limons + argiles), et de rechercher au contraire les sols les plus sableux et les plus drainants où on pourra assurer un lessivage qui évitera l'alcalisation du complexe absorbant et empêchera la rétention cumulative des sels contenus dans l'eau d'irrigation.

Une certaine inconnue réside concernant l'évolution dans le temps de la qualité de l'eau pompée. En effet, la salure de la nappe augmente régulièrement avec la profondeur ; seule la partie supérieure (quelle épaisseur ?) est utilisable. Il faudra donc faire des analyses régulières quand l'ensemble des forages sera en exploitation pour l'alimentation de Djibouti. Les débits seront peut être à modifier en fonction de l'évolution qui sera observée.



## DEUXIEME PARTIE

### CARACTÉRISATION DU PÉRIMÈTRE RETENU

---

#### I. ETUDE DU MILIEU PHYSIQUE

##### I.1 LOCALISATION

L'inventaire morpho-pédologique et la hiérarchisation de leurs facteurs limitants, nous permet de proposer le site qui répond à notre avis le mieux aux conditions élémentaires de faisabilité du projet, énoncées en introduction. La zone que nous proposons se trouve (voir carte) à 1 km au NNE du Groupement Nomade Autonome de DAMERDJOG ; elle occupe la bande d'alluvions récentes sableuses (orientée NS) du défluent latéral de gauche de l'oued Atar. Elle est soumise à des inondations et des épandages sporadiques de ce défluent, auquel s'ajoutent divers petits axes de ruissellement de peu d'importance. Une végétation arbustive d'*Acacias* et de *Balanites* assez dense s'y développe.

Le périmètre a été délimité sur le terrain à la peinture blanche, en présence de responsables du Ministère de l'Agriculture :

- . la limite Sud coïncide avec la piste qui coupe les divers petits oueds qui alimentent la petite plaine alluviale,

- . la limite Est (rive droite des épandages) correspond à la bordure de la terrasse d'alluvions ancienne, non inondable et couverte d'un pavage caillouteux discontinu,

- . la limite Ouest à peu près parallèle à la précédente (200 à 300 mètres) correspond à des îlots surbaissés d'alluvions anciennes non recouvertes par les épandages actuels. Ces reliques se reconnaissent à la présence de cailloux superficiels et aux fréquentes boursouflures de sel,

- . au Nord, nous avons limité le périmètre juste avant l'apparition des premières dunes et nebkas et des manifestations superficielles de salure. Nous sommes alors à environ 850 mètres de la bordure Sud.

La superficie inscrite dans ce polygone grossièrement rectangulaire est d'environ 25 hectares.

##### I.2 PHYSIOGRAPHIE - ETAT DE SURFACE

Une caractéristique importante est la densité relativement forte d'*Acacias* (*Acacia raddiana*) qui colonise les épandages alluviaux, en raison du passage fréquent des eaux. Associés aux *Acacias*, on trouve de petits arbustes rabougris de *Balanites aegyptiaca* de moins de 1 mètre de haut, consommés intensément par les chevres. La flore herbacée vivace est inexistante ; par contre la flore à germination annuelle semble relativement riche après les inondations. Aucune plante typiquement halophile n'a été observée.

Entre les arbustes, le sol est donc la plupart du temps totalement dénudé. Le sable basaltique gris-clair très friable est souvent recouvert par une fine pellicule limoneuse squameuse de couleur brune ; elle représente le dernier dépôt de décantation non encore pulvérisé par les chevres ou dispersé par le vent. On n'observe jamais de cailloux en surface.

La pente générale de la zone d'épandage est de l'ordre de 0,5 %. La surface topographique n'est pas strictement plane ; on y observe localement un mésorelief dû :

- à la dynamique hydrologique : les écoulements sont plus ou moins canalisés dans des chenaux à fond plats, de 20 à 50 cm d'encaissement, formant de petits talus sur leurs berges concaves. Il est probable que les emplacements de ces lits ne sont pas permanents, ils doivent se déplacer latéralement en partie ("balayage") d'une année à l'autre.

- aux accumulations éoliennes : les vents provoquent un remaniement et une redistribution des matériaux superficiels sous forme de petites dunes de 0,50 à 2 mètres de haut. Ces dunes peuvent avoir 5 à 20 mètres de long et ne sont généralement pas jointives. Elles sont de plus en plus fréquentes et hautes de l'amont vers l'aval, en même temps qu'apparaissent entre elles des boursouflures de sel.

La limite aval du périmètre a été choisie de façon à éliminer ces 2 contraintes (sel et dunes).

Des reliques de terrasse ancienne non "digérées" par les recouvrements alluviaux actuels apparaissent dans la zone d'épandage ; ils forment des bombements allongés dans l'axe d'écoulement, de moins de 1 mètre de haut, sans rupture de pente, et reconnaissables aux cailloux et au sel qui les parsèment. La présence de sel est la preuve que ces matériaux ne sont pas lessivés donc pas atteint par les eaux d'épandage. De toute façon la délimitation du périmètre a été faite de façon à éliminer ces lambeaux résiduels en les contournant.

### I.3 REGIME HYDROLOGIQUE

L'état de la surface et la végétation témoignent d'écoulements en nappe généralisés et sporadiques. La vitesse, la durée, la hauteur et la fréquence de ces épandages sont inconnus. Nous sommes dans une petite plaine de niveau de base local constituant l'exutoire d'un ensemble de petits oueds et gouttières rassemblant les eaux de ruissellement sur le cône ancien. L'oued le plus important où les débits sont sans doute les plus forts, est branché sur la rive gauche de l'oued Atar ; il s'agit d'un défluent qui se sépare de l'oued, au débouché de celui dans la plaine. Lors des crues (3 à 4 par an ?) une petite partie des eaux bifurque sur la gauche, sans cependant charrier de gros blocs sur un long trajet, car ceux-ci n'arrivent pas jusqu'au périmètre.

Les autres axes d'écoulement qui eux prennent naissance sur la terrasse ancienne ont de faibles débits ; la vitesse des eaux qui arrivent à l'aval, semble faible et ne pas constituer une contrainte importante.



En débouchant dans la plaine de niveau de base où nous avons situé le périmètre, les axes hydrographiques perdent leur encaissement ; les eaux s'étalent et s'écoulent en nappe. Les lits principaux larges de 30 à 50 mètres sont très peu encaissés (moins de 50 cm) ; relativement bien individualisés à l'amont, ils s'élargissent à l'aval et forment un réseau anastomosé de défluence. Certains axes longent la terrasse ancienne (à l'Est) ou ses lambeaux surbaissés (à l'Ouest). Une petite pellicule limoneuse desquamée discontinue (en langues) signale le dernier passage de l'eau et la décantation. Les axes principaux débordent en effet aisément et s'étalent largement. La vitesse des eaux semble faible puisque la décantation est possible. Par la suite, le vent reprend ces dépôts et le sable sous-jacent pour les redistribuer sous forme de petites nebkas à la base des arbustes, spécialement à l'aval de la zone d'épandage.

Ces inondations constituent un bon antidote contre la salinisation des sols qui est un phénomène quasi-général dans la plaine cotière. Ici, les sols sableux sont lessivés latéralement et verticalement par les eaux d'épandage qui recouvrent pluriannuellement le site. A l'aval la vitesse des eaux diminuant, et la couche sableuse supérieure étant moins épaisse, les boursouflures de sel apparaissent peu à peu en surface.

#### I.4 LES SOLS

La douzaine de profils observés nous a montré que la répartition et l'épaisseur des matériaux alluviaux, dépend d'une part des différentes phases de sédimentation dans le temps, et d'autre part d'une différenciation d'amont en aval, due à la diminution de la compétence des eaux qui déposent en premier leur charge grossière.

- la partie supérieure sur 30 à 100 cm d'épaisseur, est exclusivement sableuse, très friable grisâtre et représente l'alluvionnement très récent qui se poursuit actuellement. On y observe une nette litation, parfois entrecroisée, témoignant du balayage par les eaux d'épandage, animées de courant très variable.

- En-dessous, on trouve généralement des niveaux limoneux ou limono-sableux, bruns, assez épais, résultant d'une phase d'érosion antérieure des paléosols brun-rouge situés sur les basaltes amont. Ce matériau est friable et ne s'oppose pas au lessivage.

- Puis en dessous, ou imbriqués avec les limons précédents, entre 70 et 150 cm de profondeur, se trouve le plus souvent un niveau d'épaisseur variable de galets et cailloutis basaltiques non soudés, alternés avec des passées très sableuses et gravillonnaires.

##### 4.1 Caractéristiques physiques

- Le niveau sableux supérieur constituera le support agricole proprement dit. On n'y observe pas de différenciation pédologique particulière ni aucune trace d'horizon humifère. Sa couleur est brun-grisâtre (10 YR 3/2 à l'état humide). La texture est sableuse grossière, constituée de sables et graviers basaltiques (il n'y a pas de quartz). La base du matériau de recouvre-



ment sableux est généralement un peu plus grossière. On observe une très nette litation où s'intercalent souvent de petits lits de 2 à 5 mm d'épaisseur, de limon brun représentant les phases de décantation plus calme lors du passage des eaux.

Ce matériau est toujours extrêmement friable (parfois boulant), non structuré et filtrant (porosité intergranulaire).

Dans la partie amont du périmètre délimité, l'épaisseur de la couche de sable est de l'ordre de 50-70 cm ; elle semble diminuer régulièrement vers l'aval où elle ne représente alors que 20 à 50 cm. Seule une cartographie très fine à sondages rapprochés (tous les 20 mètres) aurait permis de délimiter des unités homogènes de classes d'épaisseur de sable. La répartition spatiale est liée étroitement à la dynamique hydrologique des divers axes d'écoulement qui, après leur encaissement à l'amont dans la terrasse ancienne, débouchent et débordent dans la plaine d'épandage, en formant des lits anastomosés larges et peu enfoncés.

- La couche sableuse repose sur le niveau limoneux par une discontinuité brutale. Ce matériau limoneux (13 % de particules de 0-2 $\mu$ , 41 % de particules 2-50 $\mu$ ), de couleur brune (7,5 YR 4/4 à l'état humide) est homogène, sans éléments grossiers, et montre une certaine litation. Il est généralement bien structuré (structure polyédrique anguleuse moyenne) et sa consistance est friable ; sa porosité est forte (pores tubulaires fins et moyens). Il possède une bonne perméabilité ; une fois humidifié ce matériau n'opposera aucune résistance au passage des racines. On observe souvent une individualisation de calcaires sous forme de mycelium blanc.

L'épaisseur de ce niveau limoneux est très variable. Le faible nombre de profils observés (une douzaine) ne permet pas d'établir les clés de répartition.

- Entre les couches de limon et de sables décrites précédemment, on trouve fréquemment un niveau de sable limoneux intermédiaire, de faible épaisseur (10 à 30 cm), de couleur brune (7,5 YR 4/4), très légèrement pris en masse.

Tout à fait en aval du périmètre commence à apparaître en profondeur (70-100 cm) un niveau de limon sableux brun, riche en gypse et constamment humidifié par la remontée capillaire de la nappe phréatique.

#### 4.2 Caractères analytiques

. Matière organique : Dans les 15 premiers centimètres, les analyses indiquent des teneurs très faibles (0,10 à 0,30 %). Ce n'est pas surprenant, aucun indice d'activité biologique ni trace de matière organique humifère n'étant visibles dans les profils. Il ne nous semble donc pas dans ces conditions, qu'un éventuel planage du terrain, puisse avoir une action néfaste sur la croissance des plantes cultivées. La création d'un milieu vivant par apport de fumier sera très bénéfique.

Remarquons que les teneurs en matière organique semblent relative-



ment plus élevées en profondeur (0,3 à 0,5 %) qu'en surface. Ceci a été observé aussi bien dans les sols de la plaine cotière que dans les sols des plaines de l'intérieur du pays.

. Phosphore : la teneur en phosphore total (extraction à l'acide nitrique) est toujours élevée, de l'ordre de 1100 ppm à tous les niveaux du sol. Les sols du périmètre sont les plus riches de tous ceux que nous avons analysés. Ceci est sans doute dû à la nature exclusivement basaltique du sable alluvial. En effet le basalte en lui-même est relativement riche en phosphore lié au calcium (contenu dans l'apatite en particulier), qui s'extraît d'autant mieux qu'il est plus divisé.

Par contre les teneurs en phosphore assimilable (méthode OLSEN), sont toujours extrêmement faibles (de l'ordre de 50 ppm). La carence en phosphore est donc très forte.

. Complexe absorbant : dans le matériau sableux supérieur qui formera le sol "agricole" proprement dit, la capacité d'échange est comprise entre 9 et 15 mé% ce qui peut sembler assez élevé compte tenu de la texture excessivement sableuse ; mais il faut penser que les sables basaltiques ont vraisemblablement été subdivisés pendant les phases mécaniques préparatoires aux analyses (tamisage, broyage, délitage) et que contrairement à des sables quartzeux, ils sont très riches en éléments minéraux. Le complexe absorbant a un pourcentage de saturation compris entre 70 et 90 % ; le calcium est dominant (5 à 10 mé%) suivi par le magnésium (2 à 3 mé%). Le sodium est en quantité négligeable. La teneur en potassium échangeable est de l'ordre de 0,40 mé%, ce qui compte tenu de la granulométrie grossière est assez élevé (4 à 5% de la somme des bases échangeables).

En définitive d'après ces résultats, il ne semble pas y avoir de déséquilibre, ni de carences graves en potassium, magnésium et calcium.

. pH : sur les échantillons analysés, les valeurs sont toujours très élevées, presque toujours supérieures à 9. (9,10 à 9,30) dans les 50 premiers centimètres et de l'ordre de 9 en dessous.

Ces pH fortement alcalins ne s'expliquent pas par des conductibilités et des teneurs élevées en sels solubles, qui sur ces sols sableux sont faibles. Ils sont plutôt dus à la richesse relative en bicarbonates de la solution du sol. Des pH aussi élevés sont susceptibles de bloquer l'assimilation de certains oligo-éléments. Il faudra baisser le pH en apportant des engrais acidifiants.

. Calcaire : Le matériau supérieur est toujours riche en calcaire total (de l'ordre de 13 %). La teneur en calcaire actif diffus est d'environ 2 %.

A l'oeil nu le calcaire s'observe sous la forme d'enduits blanchâtres autour des grains basaltiques, provenant de la précipitation des bicarbonates contenus dans les eaux d'épandage.

En profondeur, dans les niveaux limoneux ou limono-sableux moins



récents, les teneurs en calcaire sont un peu plus élevées (14 à 15 % de calcaire total, 5 % de calcaire actif). Ils sont en partie à l'état de mycélium blanchâtre bien répartis autour des agrégats.

. Salinité : sur la majeure partie du périmètre, le sol sableux supérieur présente une conductibilité (dans l'extrait au 1/5) inférieure à 250  $\mu$ mhos/cm, donc faible et ne présentant aucun inconvénient puisque la plupart des cultures légumières ont un seuil de tolérance se situant vers 750  $\mu$ mhos.

En profondeur, dans le limon sableux, la conductibilité reste toujours en-dessous de cette valeur, tant que l'on ne se trouve pas trop à l'aval de la zone d'épandage alluviale. Le profil DJ 5 (annexe) par exemple montre une rapide augmentation de la conductibilité en dessous de 15 cm de profondeur : 1000  $\mu$ mhos entre 15 et 50 cm, 2500  $\mu$ mhos entre 60 et 85 cm.

Ces caractères analytiques s'accompagnent de quelques boursoufflures salines éparses en surface. Nous avons limité le périmètre avant qu'apparaissent ces manifestations.

Le sel contenu en profondeur est toujours à nette dominance de chlorure de sodium et en moindre quantité, de sulfate de calcium (gypse).

. Bore : Les teneurs en bore soluble (à l'eau chaude, rapport sol/eau = 1/2) sont assez étroitement liées à la conductibilité de l'horizon et donc à sa teneur en sels solubles. En-dessous de 250  $\mu$ mhos/cm (extrait 1/5), la teneur en bore soluble reste inférieure de 1 ppm, seuil que l'on peut considérer comme limite, au dessus duquel il peut devenir toxique. En fait, ce seuil de toxicité est très variable en fonction des cultures ; d'autre part, le seuil de carence, et le seuil de toxicité étant assez voisins, l'interprétation de la teneur en bore du sol est toujours très délicate. La plupart des cultures maraichères envisagées semblent semi-tolérantes au bore. Il semble que l'on puisse aller jusqu'à 1,5 ppm.

Les analyses montrent que la partie supérieure du sol, c'est à dire la partie sableuse non salée, ait des teneurs en bore soluble comprises entre 0,5 et 0,8 ppm. En dessous de 50 cm de profondeur, dans les limons sableux, et spécialement à l'aval de la plaine d'épandage, la teneur en bore augmente rapidement en même temps que la conductibilité, et peut atteindre 10 ppm. De toute façon ces zones ont été éliminées du périmètre retenu. Il n'y a donc pas de risques de toxicité actuellement, mais la teneur en bore peut augmenter, par les apports d'eaux d'irrigation. Cet élément peut se concentrer progressivement car il est plus difficilement lessivé que les sels solubles. Il sera bon de vérifier que la teneur en bore de l'eau de forage est inférieure à 1,5 mg/litre. L'évolution de la teneur du sol devrait être suivie par des analyses régulières.

## I.5 APPRECIATION SYNTHETIQUE

Le périmètre proposé pour l'aménagement possède les avantages suivants :

- Les sols ne sont pas salés : qualité inestimable pour la plaine cotière soumise à une salinisation quasi-généralisée. Cette absence de sels est due à la nature très sableuse du matériau, à l'absence de niveau compact en profondeur, et au lessivage latéral et profond assuré par des inondations périodiques.

- Les risques de dégradation et de salinisation par les eaux d'irrigation sont limités : c'est en tout cas dans cette situation morphopédologique que ces risques sont les plus faibles. Ailleurs, sur des sols à texture fine ou à plancher argileux compact, les eaux d'irrigation qui seront de qualité médiocre, présentent des dangers.

- La disposition géographique est satisfaisante : 25 à 30 ha relativement homogènes, d'un seul tenant, et de forme pratique pour l'installation du réseau d'irrigation ont pu être délimités. La proximité du GNA de Damerdjog (800 à 900 mètres) est intéressante. Enfin, la ligne de forage est située à environ 1500 mètres de l'amont du périmètre, ce qui est raisonnable.

- Absence de problèmes fonciers : Cette zone en effet est totalement inexploitée ; il ne semble pas y avoir de nappe phréatique douce proche de la surface.

Ces avantages s'accompagnent d'inconvénients et obligations qui ne doivent pas être sous estimés dans la factibilité du projet :

- les inondations circulantes (écoulements en nappe) : cette dynamique hydrologique, a côté de ses effets bénéfiques sur le lessivage des sols, est certainement une contrainte pour le périmètre.

Nous n'avons pas été témoins de cette dynamique ; d'après la physiographie de surface, il ne semble pas y avoir des courants d'eau dévastateurs, mais une protection sera néanmoins nécessaire.

- la nature extrêmement sableuse des sols : Dans ce type de milieu aride où le sol constitue la contrainte édaphique essentielle, les sols sableux facilement lessivables et à faible pouvoir fixateur pour les sels et le sodium offrent les meilleures garanties. Par contre, ils imposent un type d'irrigation adapté. L'irrigation par gravité est tout à fait à déconseiller (voir plus loin) ; par contre le système du "goutte à goutte" convient parfaitement.

L'absence de structure pédologique superficielle et d'activité biologique (support inerte) nécessitera la création progressive d'un vrai "sol" par apport important de fumier.

- le mésorelief et la végétation nécessiteront des travaux de défrichement et éventuellement de planage.



## II. MISE EN VALEUR DU PERIMETRE

Il ne nous est pas possible, à ce stade, de donner des indications très précises sur les modalités des aménagements à entreprendre et sur la conduite des pratiques culturales. Les diverses investigations de terrain et de laboratoire ont permis de diagnostiquer les contraintes essentielles du milieu naturel et de proposer des orientations générales afin de s'y adapter ou d'y remédier.

Les aménagements précis, compte tenu de ces indications et d'études complémentaires éventuelles (topographie, régime hydrologique) seront entrepris par des spécialistes en Génie Rural (protection contre les épanchages), en techniques hydro-agricoles (irrigation) et par les agronomes (production agricole).

Un protocole d'essais agronomiques a été établi par le Service de l'Agriculture ; il est destiné à adapter aux conditions écologiques locales très particulières, les techniques optimales de production maraîchère. Ce périmètre expérimental d'un hectare et demi fournira les données de base manquantes (pratiquement rien n'est connu) en matière d'agronomie (variétés, fumures, phytopathologie, doses d'irrigation, etc ...) indispensables avant d'envisager la réalisation de 10 hectares.

En effet à Djibouti, l'absence d'expérience dans le domaine de la production économique de légumes à hauts rendements constitue un gros handicap au départ. Une extrême prudence est de rigueur, compte tenu (malgré les précautions prises lors du choix du site) de l'incertitude concernant l'évolution de la qualité des sols soumis à des irrigations dont les eaux sont de qualité chimique médiocre (si on se fie aux analyses qui nous ont été communiquées)

### II.1 L'AMELIORATION DE LA FERTILITE DU SOL

#### 1.1. Amélioration de l'horizon superficiel

Comme nous l'avons déjà mentionné, il sera important de créer progressivement un "sol" sur les 20 cm supérieurs : développement d'une structure favorable à l'enracinement comme à la rétention de l'eau, installation d'une activité biologique (micro-organismes).

L'apport de fumier sera une solution intéressante. Le fumier sec disponible aux abattoirs de la ville pourra être utilisé après traitement adéquat (ensemencement, fermentation) dans des fumières spéciales.

On peut envisager en complément la production d'engrais vert (cultures fourragères) pour l'enfouissement, en alternance avec les légumes. Dans ce cas, l'irrigation par aspersion sera plus adaptée que le "goutte à goutte". Le travail du sol pourra être réduit au minimum sur ces sols sableux et friables.

## 1.2. Fertilisation

Les analyses de sol, aussi imprécises qu'elles soient pour la détermination des carences, indiquent cependant une très forte carence en phosphore assimilable. Si l'on juge sur la teneur du complexe absorbant, il ne semble pas que le potassium soit déficitaire, ni évidemment le calcium et le magnésium.

Il faudra donc surtout apporter du phosphore et de l'azote. Les doses et fréquences seront à déterminer en parcelles d'expérimentation.

L'apport des engrais solubilisés dans les eaux d'irrigation est la méthode la plus rationnelle compte tenu des conditions écologiques et pédologiques et du mode d'irrigation qui sera adopté (aspersion ou "goutte à goutte"). C'est la méthode la plus économique et la plus efficace ; par ses facilités de fractionnement, elle répond le mieux aux besoins des plantes en fonction de leur stade végétatif. Compte tenu de la forte alcalinité du sol ( $\text{pH} > 9$ ) susceptible de provoquer des carences en oligo-éléments, il sera préférable d'apporter les formes d'engrais les plus acidifiantes : sulfate d'ammoniaque, chlorure de potassium ... Pour le phosphore, la forme d'engrais a moins d'importance (sel d'acide faible) ; mais il doit être le plus soluble possible.

Pour déterminer les carences en oligo-éléments (fer et zinc en particulier), des analyses foliaires ainsi que des essais en pots pourront être réalisés.

## II.2 AMENAGEMENTS

### 2.1. Protection contre les vents

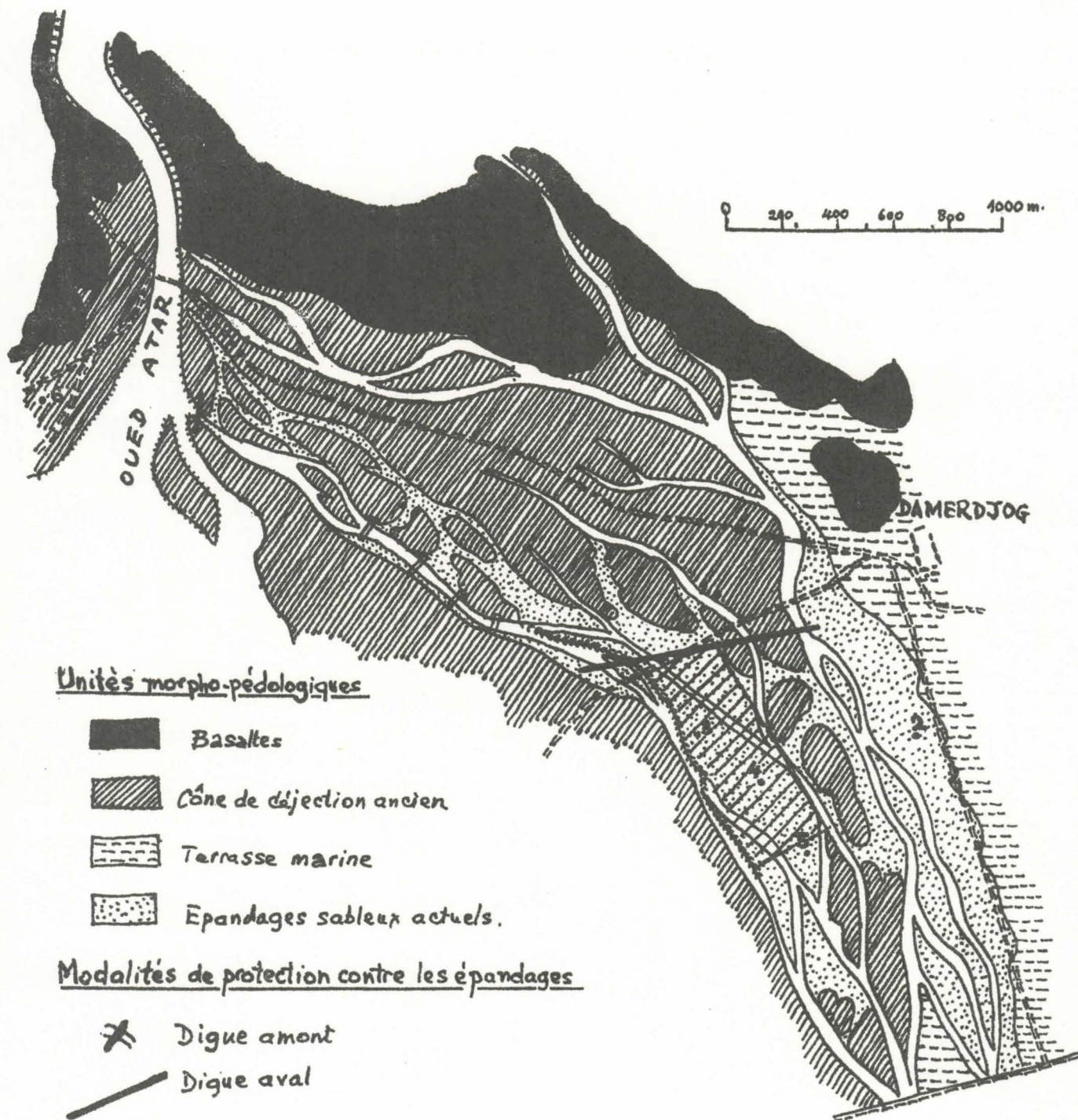
Les vents de direction Est-Ouest constituent une contrainte importante. Ils imposent la création de brise-vents (végétaux ou artificiels) orientés Nord-Sud, c'est à dire perpendiculaires à l'axe d'allongement du périmètre et des écoulements d'eau actuels. Ces brise-vents sont indispensables en cas d'irrigation par aspersion.

Les haies végétales pourront être à base de *Prosopis juliflora* (espèce introduite depuis une dizaine d'années, à croissance très rapide), *Casuarina*, *Tamarix* ... Il faudra les intégrer dans le réseau d'irrigation.

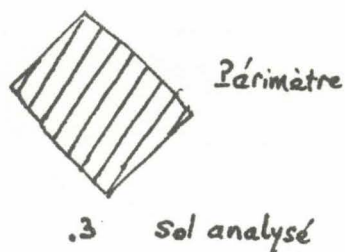
### 2.2. Protection contre les crues

Les épandages d'eau débouchant à l'amont constituent la contrainte essentielle du site choisi. On ne connaît malheureusement pas la force et la fréquence des eaux d'inondation. La nature des aménagements de protection demandera une petite étude topographique et hydrologique du bassin dominant le





## SITUATION DU PERIMETRE PROPOSÉ



périmètre sur le cône de déjection ancien, ainsi que du mode d'alimentation du défluent de l'oued Atar qui constitue l'axe d'écoulement principal à traiter.

On pourra envisager divers types de travaux (voir croquis) :

- la construction d'une digue à l'amont, au niveau de la prise d'eau alimentant le défluent lors des crues de l'oued Atar. Cette digue pourrait être complétée par le creusement d'un canal destiné à refouler, dans l'axe principal de l'oued Atar, les eaux qui prennent la mauvaise voie ;
- la construction d'une longue digue (800 mètres) en gabions, à l'amont immédiat du périmètre, afin de dériver les eaux vers la zone d'épandage voisine située au Sud de Damerdjog ;
- la création de petits replats étagés sur le lit amont de l'oued principal qui débouche sur le site, dans le but d'atténuer la force du courant ;
- enfin on peut endiguer avec un remblai d'environ 1 mètre de haut, le défluent de l'oued Atar à partir de son débouché dans la plaine afin d'empêcher son débordement sur le site. On s'arrangera ainsi pour que les écoulements principaux soient localisés sur la bordure Est du périmètre d'irrigation, contre la terrasse ancienne.

### 2.3. Planage - Défrichement

Les travaux à entreprendre dépendent étroitement du type d'irrigation qui sera adopté. Un système gravitaire impose un planage minutieux et l'établissement d'une carte topographique précise (1/2.000).

Dans le cas de l'aspersion et du "goutte à goutte", un planage parfait n'est pas nécessaire. Seules seront arasées les accumulations éoliennes les plus importantes (plus de 1 mètre de haut).

L'arrachage total des Acacias n'est pas obligatoire en cas d'irrigation au "goutte à goutte". Les arbres ont une certaine utilité pour freiner la force du vent.



## II.3 L'IRRIGATION

Trois grands types d'irrigation peuvent être envisagés :

- L'irrigation à la raie,
- l'irrigation par aspersion,
- l'irrigation localisée, plus spécialement le système "goutte à goutte".

Nous insisterons surtout sur le "goutte à goutte", système qui était envisagé dès l'origine du projet et qui s'avère effectivement le plus prometteur compte tenu des conditions locales.

### 3.1. L'irrigation à la raie

Sur ce type de sol, extrêmement sableux et filtrant, l'irrigation à la raie aura une très faible efficacité. Elle demandera des soins particuliers tels qu'un réseau de canaux cimentés. Un planage soigné et la connaissance précise de la topographie seront en outre indispensables. Le coût de l'aménagement risque donc d'être très élevé, et l'infrastructure manquera de souplesse. Les sols à faible capacité de rétention en eau, demanderont de faibles doses d'irrigation et une grande fréquence. Dans ces conditions, la pratique de l'irrigation à la raie, pour être bien réalisée, demande une bonne technicité et une main d'œuvre abondante, ce qui peut être une contrainte dans les conditions de Djibouti.

Le coût élevé du pompage de l'eau demande que l'on limite le gaspillage, donc que l'efficacité de l'irrigation soit maximale, conditions qui ne peuvent pas être réalisées sur ces sols.

Un autre inconvénient sera la forte consommation d'engrais et d'herbicides, qui seront en grande partie entraînés en profondeur avec les eaux de percolation.

En faveur de ce type d'irrigation, il faut cependant signaler que les infiltrations, qui peuvent paraître excessives comparées aux besoins théoriques des plantes, seront quand même bénéfiques pour assurer un lessivage des sels apportés par les eaux d'irrigation et par les vents marins. Pour une eau de 2000  $\mu\text{mhos/cm}$  la dose supplémentaire de lessivage sur sol sableux devra être les 3/4 des besoins de la culture. Si celle-ci consomme 5,5 mm/j, il faudra apporter au total environ 10 mm.

### 3.2. L'irrigation par aspersion

Cette technique, qui peut sembler avantageuse sur sols sableux très drainants, par rapport à l'irrigation par gravité (efficacité plus élevée) présente cependant de gros inconvénients dans les conditions écologiques existantes dans la plaine côtière :

. Le vent : d'une force moyenne à forte (3 à 5 m/s) mais à peu près constante pendant la journée tout au long de l'année, réduira fortement l'efficacité de l'aspersion du fait de l'évaporation; de 87 % avec des vents de 2m/s, cette efficacité passe à 60 % avec des vents d'une vitesse de 5 m/s. Une solution serait d'arroser la nuit, quand les vents tombent, mais cela sera peut être difficile à appliquer (surtout si on utilise l'énergie solaire).

L'irrigation de jour conduira à utiliser des asperseurs à basse ou moyenne pression. Il faudra également adopter une maille d'arrosage réduite. Pour des vents de 3 à 5 m/s, on préconise une maille rectangulaire dont la longueur  $L = 2/3a$  et la largeur (perpendiculaire à la direction du vent)  $l = 1/2a$  ; avec  $a = R\sqrt{2}$ , R étant la portée du jet.

Les brises-vents seront naturellement indispensables.

. L'utilisation d'eaux relativement salées : telles que celles de la nappe des basaltes (2800  $\mu$ mhos/cm, 2 g/l de résidu sec) est généralement déconseillée pour l'irrigation par aspersion. On considère en effet qu'une eau de plus de 1500 mg/l est dangereuse pour le feuillage (brûlures) spécialement sur cultures maraîchères. En dehors de cet inconvénient, il est démontré que les eaux salées sodiques ne conviennent pas à l'aspersion ; une pluie fine tombant au sol est beaucoup plus sensible à la reprise rapide par l'évaporation qu'une nappe d'eau amenée par gravité qui draine en profondeur. Il s'en suit que la tranche supérieure du sol a tendance à se saler dans des délais brefs.

. L'aspersion risque d'autre part de favoriser le développement de maladies sur les cultures maraîchères. La faible expérience que l'on ait des cultures de tomates dans la plaine cotière de Djibouti, caractérisée par une forte humidité atmosphérique, montre une grande sensibilité aux maladies, que l'irrigation par aspersion risque d'aggraver.

### 3.3. L'irrigation au goutte à goutte

C'est le système d'irrigation qui est certainement le mieux adapté aux conditions locales et pour les cultures envisagées (cultures maraîchères). Il ne comporte pas les inconvénients cités précédemment (vent, brûlure du feuillage, drainage excessif, planage, etc ...). L'efficacité du goutte à goutte est voisine de 1 et peut même être supérieure puisque toute la surface n'est pas mouillée et que les doses sont calculées en fonction de bilans globaux pour une couverture totale du sol. Ce système valorise donc au mieux l'eau de pompage, qui est une eau chère. Il valorise aussi au maximum les engrais puisque ceux-ci peuvent être apportés en solution dans l'eau d'irrigation, en se répartissant uniquement dans le bulbe d'humectation situé sous la plante, donc à la dose juste nécessaire pour l'alimentation de celle-ci.

Enfin, ce mode d'irrigation ne demande pas une main d'oeuvre abondante et très qualifiée.

L'irrigation au goutte à goutte a fait ses preuves dans les pays arides sur sols très sableux et avec des eaux salées, donc dans des conditions voisines de celles de Djibouti. Les Israéliens ont, dans ce domaine, la plus



grande expérience, dont on pourra s'inspirer.

Le choix d'un type de matériel optimal pour les conditions existantes peut être assez délicat compte tenu du nombre élevé de fabricants (une quarantaine) de goutteurs différents (une cinquantaine environ), qui affirment tous que leur système est le meilleur. Les qualités que l'on demande à un goutteur, élément essentiel du système, sont d'avoir un débit régulier, assurant une répartition d'eau homogène sous la plante, et d'être relativement peu sensibles aux obstructions, qui sont pourtant inévitables à un moment donné compte tenu des faibles débits utilisés et des petits diamètres des conduits (moins de 1,2 mm). Les goutteurs "à circuit long" donnent toujours des débits plus réguliers que ceux "à circuit court", et sont peu sensibles aux variations topographiques de détail. Par contre ils sont généralement plus sensibles aux obstructions partielles ou totales.

. La répartition de l'eau sous le goutteur est une caractéristique du type de sol (homogénéité, granulométrie) ainsi que du débit de l'eau à la sortie du goutteur. La forme du bulbe de diffusion de l'eau est importante à connaître. Au bout d'un temps suffisant d'irrigation, lorsque l'équilibre est réalisé, le bulbe doit être régulier ; il ne doit pas être trop étalé (galette), ce qui se passe si le débit du goutteur est trop élevé, car cela augmente l'évaporation entre les plantes et réduit l'efficacité ; le bulbe ne doit pas non plus être trop profond pour que les jeunes pousses ne souffrent pas en début de cycle et qu'il n'y ait pas de pertes par percolation. La bulbe idéal doit être réparti régulièrement à la verticale de la masse végétale, entre 10 et 60 cm de profondeur, et sur environ 1 mètre de largeur. Pour cela, les débits ne doivent pas être trop importants en sols sableux (moins de 3 l/h) sinon on aboutit à une perte en profondeur, qui n'est pas forcément causée par des doses trop fortes par rapport aux besoins de la plante.

Des essais réalisés par l'IRAT dans le Nord Sénégal sur des sols très sableux, pour tester une quinzaine de goutteurs des principaux fabricants ont donné l'avantage au goutteur NETAFIM à chicanes (firme Israélienne ; fabriqué et commercialisé en France par la Société KULKER). Avec un débit de 2 l/h sur sol très sableux, le bulbe a la forme régulière et les dimensions requises telles que nous les avons énoncées précédemment. Des observations de profils et des prélèvements pour mesurer l'humidité pondérale après un certain temps d'irrigation, permettront de corriger éventuellement les doses. (voir plus loin pour le protocole de mesures).

. Les obstructions : c'est le problème le plus délicat du goutte à goutte. Dans les conditions naturelles du périmètre de Atar, les bouchages pourront avoir 2 causes principales :

- Les bouchages internes dus à l'eau d'irrigation

Les eaux qui seront utilisées proviennent de la nappe phréatique des basaltes et seront pompées à plus de 20 m de profondeur ; elles ne contiennent pratiquement pas à la sortie du forage d'impuretés solides, en suspension. Mais s'il est prévu de les stocker dans un réservoir, leur pollution externe est à craindre par les vents chargés de sable et poussières soufflant toute



l'année. D'autre part il faudra prendre soin de contrôler le développement des algues. Pour toutes ces raisons, il faudra prévoir un dispositif de filtrage efficace en tête de réseau (par exemple le filtre NETAFIM à mailles  $140\mu$  et  $120\mu$ ).

Les obstructions dues aux précipitations des sels et carbonates contenus dans l'eau seront sans doute plus gênantes, en provoquant des crôutes à la sortie des goutteurs et des enduits qui réduisent le débit, à l'intérieur des goutteurs eux-mêmes. L'analyse d'eau de forage indique  $210 \text{ mg/l}$  de bicarbonates (résultant d'une seule analyse), ce qui ne semble pas excessif ni susceptible de provoquer des bouchages trop fréquents. Par contre le chlorure de sodium ( $1,3 \text{ g/l}$ ) et de sulfate de calcium ( $0,21 \text{ g/l}$ ) peuvent être assez gênants.

Les essais réalisés par l'IRAT (cités précédemment) ont montré que le modèle NETAFIM à chicanes résistait bien aux obstructions et que c'était le meilleur système testé. Le débouchage, lorsqu'il est nécessaire, se fait très facilement et rapidement par pincement avec une pince universelle ou en tapotant avec un bout de bois. Cependant, on pourra prévenir les obstructions calcaires en injectant une fois par an (par exemple) une dose d'acide dilué.

#### - Les bouchages externes

Les vents chargés de poussières et de sables risquent de se déposer autour des orifices des goutteurs mouillés, pendant leur fonctionnement. Cela peut être une contrainte aussi gênante que celle des bouchages internes. Le rôle des brises-vents sera ici prépondérant.

#### . Implantation des goutteurs, doses et fréquences d'irrigation

Les besoins théoriques estimés de façon assez grossière par la méthode de Blaney-Criddle corrigée (ETP) sont de l'ordre de  $5,1$  à  $6,5 \text{ mm/jour}$ . Une évaluation plus fine pourra être faite d'après la quantité d'eau journalière évaporée dans le bac de classe A. Les travaux de GOLDBERG montrent en effet que les besoins moyens des plantes sont compris entre  $60 \%$  et  $80 \%$  de l'évaporation Bac classe A. Mais en fonction du type de culture et de son stade végétatif, des coefficients multiplicatifs spécifiques assez faibles peuvent être appliqués. On pourra alors se baser sur l'évaporation du jour précédent pour appliquer la dose adéquate. Une efficience de  $1$  pourra être adoptée. L'installation d'un bac classe A sur le périmètre d'Atar s'avère donc indispensable, si l'on veut appliquer les doses optimales.

Un autre système consisterait à installer des tensiomètres dans la zone racinaire ; ces tensiomètres reliés à des électro-vannes commanderont le déclenchement de l'irrigation au dessus d'une certaine pression de succion d'eau dans le sol ( $0,5 \text{ bar}$  soit  $pF 2,7$ ). Ce système peut alimenter les goutteurs de façon entièrement automatique.

Compte tenu de la faible capacité de retention des sols sableux du périmètre, nous préconisons une fréquence d'irrigation journalière ; c'est celle qui a donné les meilleurs résultats dans des conditions semblables, sur cultures



maraichères en Israël.

Pour une dose donnée, la durée journalière d'irrigation dépend du débit des goutteurs utilisés et de leur densité à l'hectare. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le système NETAFIM à chicanes semble présenter les qualités les plus intéressantes dans le contexte local. Le débit du goutteur est d'environ 2l/h (pour une pression de 1 à 2 kg/cm<sup>2</sup> en tête de réseau).

La répartition spatiale des goutteurs dépendra du type de cultures maraichères. Pour les tomates, les aubergines, les piments on peut envisager des lignes jumelées de cultures espacées de 140 x 60 x 140, et des plants espacés de 50 cm sur les lignes. La rampe de goutteurs sera alors située entre la ligne jumelée ; l'espacement des rampes sera donc de 2 mètres. La densité des goutteurs sera de 1/2 m<sup>2</sup>. Avec un débit de 2l/h, si on irrigue pendant 6 à 7 heures par jour, la dose d'arrosage sera donc de 6 à 7 litres/m<sup>2</sup>/jours, soit 6 à 7 mm/jours, ce qui correspondra aux besoins théoriques. On pourra moduler la durée d'irrigation journalière en fonction de la plante cultivée, de son stade végétatif, de la période de l'année (indications du bac classe A), des nécessités de lessivage du sel dans le bulbe ou à sa périphérie, etc ...

Pour les pastèques et melons dont l'emprise racinaire est plus étalée en surface, il faudrait prévoir une répartition différente des goutteurs : lignes de cultures espacées de 2 mètres et plants tous les mètres sur la ligne. Les rampes de goutteurs passeront aux pieds des plants. La densité des goutteurs sera la même que précédemment (1/2 m<sup>2</sup>).

En ce qui concerne les carottes et les oignons (à forte densité), "le goutte à goutte" s'avère moins bien adapté car ces cultures demandent plus de goutteur (1/m<sup>2</sup>), ce qui augmente le coût.

Le problème du sel : Actuellement (avant aménagements), le lessivage naturel des sels est assuré (contrairement aux zones environnantes) par les eaux d'épandage de crues en provenance des petits oueds débouchant à l'amont du périmètre. Mais quand les protections contre les inondations seront réalisées, la concentration générale en sels sur le périmètre augmentera peu à peu du fait, d'une part de l'irrigation par des eaux à 2 g/l (résidus sec) et d'autre part par les vents d'Est chargés de sels marins.

Le sel contenu dans l'eau d'irrigation au goutte à goutte se concentre préférentiellement en périphérie du bulbe de diffusion. L'intérieur du bulbe n'est en principe pas salé si l'irrigation assure un flux lent et continu centrifuge. Il sera prudent de prévoir à certaines périodes (plusieurs fois par an) des doses d'irrigation nettement supérieures aux besoins des plantes de façon à repousser la frange d'accumulation de sels vers l'extérieur du bulbe "utile" correspondant à la masse racinaire.

En plus de cela un lessivage général de la zone cultivée devrait être pratiqué à intervalles de 3 ans. En Israël, sur de tels sols sableux, les doses de lessivage sont de l'ordre de 5000 m<sup>3</sup>/ha, ce qui équivaut pour 1 ha à l'utilisation totale du débit du forage (60 m<sup>3</sup>/h) pendant 3 à 4 jours complets. Cela nécessiterait un réseau d'amenée d'eau spécial.

Afin de suivre l'évolution de la salinisation éventuelle du sol, il faudra effectuer des prélèvements systématiques réguliers (tous les 6 mois par exemple) répartis sur le périmètre irrigué. On déterminera la conductibilité électrique, la répartition des sels solubles, le pH et le calcaire actif. Il serait également très souhaitable de connaître l'évolution du taux de bore soluble, qui accompagne la plupart du temps le chlorure de sodium, mais qui par contre une fois fixé dans le sol est plus difficile à lessiver. Il ne faut pas que sa teneur dépasse 1 ppm. dans la tranche de sol exploitée par les racines.

Afin d'avoir une bonne connaissance de la répartition des caractères analytiques précédents dans la zone du bulbe d'humectation, exploitée par les racines, il sera bon d'utiliser un protocole de prélèvements établi et constant. Les échantillons peuvent être prélevés à la grille de dimension 2 m x 0,80, à mailles de 10 x 10 cm, et posée sur la paroi de la fosse creusée perpendiculairement à la ligne de cultures et de goutteurs.

Les mailles indiquent les coordonnées des échantillons prélevés. On en profitera pour observer la répartition racinaire sous le goutteur ; un tel dispositif permet également de mesurer l'humidité pondérale dans les carrés de la grille lorsque l'équilibre entre débit-dose et évapotranspiration d'autre part est atteint ; reportée sur un schéma on aura la forme du bulbe d'humectation caractéristique du goutteur et du sol montrant les zones d'égales humidités.

Des corrections éventuelles de doses et de fréquences d'irrigations permettront alors d'ajuster au mieux la forme du bulbe.



# ANNEXES

---

DESCRIPTIONS ET ANALYSES DE SOLS

Situation : 500 mètres au pied du massif du "Tourka Damerdjog", environ 900 mètres sur la rive gauche de l'oued Damerdjog.

Unité morphopédologique : Sédiments sablo-coquilliers de la terrasse marine. Paléosol brun rouge, salé et gypseux.

Etat de surface : Pente faible (moins de 0,5 %), très régulière, sans micro ou méso-relief. Absence totale de végétation. Nombreuses boursouflures salines poudreuses, de couleur brun-rouge.

Description :

0 - 15 cm : Couche superficielle de recouvrement (remaniement en place et transit de matériau apporté par le ruissellement de l'amont). Brun (7,5 YR 4/4 à l'état humide). Lits de sables grossiers basaltiques. Texture d'ensemble limono-sableuse. Absence d'éléments grossiers. Très friable. Structure soufflée. Très salé (nombreux cristaux visibles). Très calcaire (à l'état diffus). Limite inférieure très nette et régulière.

15-40 cm : Rouge-jaunâtre (5 YR 4/8 à l'état humide). Sans tache. Horizon salé (cristaux visibles de NaCl). Structure soufflée à polyédrique fine. Friable. Texture limono-argileuse. Absence d'éléments grossiers. Très calcaire (à l'état diffus). Limite distincte à graduelle avec l'horizon inférieur.

40-100 cm : Rouge-jaunâtre (5 YR 4/8 à l'état humide). Nombreux amas calcaires friables blanchâtres de 3 à 15 mm de large, et quelques nodules de 5mm de diamètre. Présence de calcaire à l'état diffus. Absence d'éléments grossiers. Texture limono-argileuse. Structure polyédrique moyenne. Aspect d'ensemble très massif (pas de fentes). Compact. Légèrement salé au goût. Nombreux amas gypseux cristallisés.

Horizon		DJ 11	DJ 12	DJ 13	
Numéro laboratoire		1	2	3	
Profondeur		cm	0-15	15-40	50-100
Humidité à pF	4,2	%			
	2,5	%			
	2,0	%			
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%	0	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )		29,3	29,5	27,4
	Limon fin (2-20 $\mu$ )		20,6	24,3	20,2
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )		8,4	11,5	7,5
	Sable fin (50-200 $\mu$ )		21,2	15,9	20,7
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )		20,5	18,8	24,2
Calcaire total		%	19,4	19,1	20,3
Calcaire actif			7,12	8,12	8,50
Matière organique		%	0,81	0,60	0,38
Carbone total			0,47	0,35	0,22
Azote total		%	0,30	0,26	0,19
C/N			16	14	12
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		ppm	543	545	448
Phosphore assimilable (Olsen)			47	38	29
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	17,13	14,57	22,32
	Mg "		12,45	10,96	6,68
	Na "		0,10	0,10	2,93
	K "		1,61	1,31	0,94
	Somme des bases échangeables		31,29	26,94	32,87
	Capacité d'échange		11,60	15,10	15,10
	Saturation	%	/	/	/
pH (eau)			8,05	8,05	8,35
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		14400	10100	8500
	Na <sup>+</sup>	mé%	71,74	46,74	31,32
	Ca <sup>++</sup>		18,13	13,13	21,09
	Mg <sup>++</sup>		6,87	5,73	3,75
	K <sup>+</sup>		1,59	1,09	0,87
	Somme des cations		98,33	66,69	57,03
	Cl <sup>-</sup>		90,85	62,89	33,62
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		1,45	2,95	19,14
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,41	0,49	0,49
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		92,71	66,33	53,25
Bore soluble (1/2)		ppm	/	/	/



**Situation** : 800 mètres au NE du GNA de Damerdjog. A environ 400 mètres de l'Oued Damerdjog, sur sa rive droite.

**Unité morphopédologique** : Epandages alluviaux sableux actuels des défluents latéraux du cône de l'Oued Atar.  
Recouvrement de faible épaisseur (35 cm) sur le paléosol de la terrasse marine.

**Etat de surface** : pente faible (0,5 %), très régulière, sans micro ni méso-relief.  
Végétation éparse d'*Acacia raddiana* de 2 à 3 mètres de haut.

#### Description :

0 - 35 cm : Recouvrement alluvial récent, riche en sables basaltiques nettement lités. Couleur brun sombre (7,5 YR 3/2 à l'état humide). Sans taches. Texture sablo-limoneuse (sables très grossiers abondants). Absence de cailloux. Structure litée. Très friable. Porosité intergranulaire. Présence de calcaire actif. Non salé. Limite très nette (discontinuité) et ondulée avec le matériau inférieur.

35 - 60 cm : Paléosol sur sédiments marins sablo-coquilliers. Couleur brune (7,5 YR 5/4 à l'état humide). Quelques petites taches blanches (amas friables) de calcaire. Présence de calcaire à l'état diffus. Texture limono-argileuse. Absence d'éléments grossiers. Structure massive. Très compact. Non salé au goût.

Horizon		DJ 21	DJ 22	DJ 23	
Numéro laboratoire		4	5	6	
Profondeur		0-12	12-35	35-60	
Humidité à pF		4,2			
Humidité à pF		2,5			
Humidité à pF		2,0			
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	31	0	
	Argile (0-2 $\mu$ )	9,6	7,3	23,9	
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	12,7	2,2	18,7	
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	13,9	2,3	18,6	
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	39,3	9,9	26,0	
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	24,5	78,2	12,8	
Calcaire total		30,8	47,0	21,5	
Calcaire actif		4,43	2,81	6,37	
Matière organique		0,40	0,33	0,48	
Carbone total		0,23	0,19	0,14	
Azote total		0,12	0,14	0,23	
C/N		19	14	12	
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		782	670	927	
Phosphore assimilable (Olsen)		39	27	43	
Complexe absorbant	*Ca échangeable	5,91	2,50	4,61	
	Mg "	4,65	3,43	7,02	
	Na "	0,23	0,48	3,92	
	K "	0,77	0,32	1,09	
	Somme des bases échangeables	11,56	6,73	16,64	
	Capacité d'échange	13,80	7,35	20,40	
	Saturation	84	92	82	
pH (eau)		9,40	9,20	9,20	
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	171	695	1230	
	Na <sup>+</sup>	0,65	3,26	5,98	
	Ca <sup>++</sup>	0,23	0,30	0,18	
	Mg <sup>++</sup>	0,08	0,14	0,11	
	K <sup>+</sup>	0,06	0,06	0,07	
	Somme des cations	1,02	3,76	6,34	
	Cl <sup>-</sup>	0,08	2,28	3,76	
	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	0,09	0,61	1,91	
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,88	0,87	1,14	
	CO <sub>3</sub> <sup>---</sup>	0	0	0	
	Somme des anions	1,07	3,76	6,81	
Bore soluble (1/2)		0,6	2,4	13,5	



Situation : A l'intérieur du périmètre sélectionné, à environ 200 mètres de la piste qui en forme la limite amont.

Unité morphopédologique : Alluvions actuelles sableuses des défluent latéraux de l'oued Atar. Zone soumise à des inondations dues aux débordements des petits oueds.

Etat de surface : Pente générale de l'ordre de 0,5 %. Végétation relativement dense d'Acacias (*A. radianna*) de 2 à 4 mètres de haut et de Balanites (moins de 1m de haut). Microrelief irrégulier : accumulations éoliennes de 50 cm de haut à la base des arbustes (nebkas).  
Fine pellicule brune limoneuse squameuse, par endroit.

#### Description :

0 - 50 cm : Couche alluviale récente. Sable basaltique pratiquement pur montrant une très nette litation : Alternance de sables grossiers, très grossiers et de graviers (surtout à la base). Couleur d'ensemble brun-grisâtre foncé (10 YR 5/2 à l'état humide). Absence de structure. Sable très friable, parfois bouillant. Porosité intergranulaire. Présence de calcaire à l'état diffus. Limite très nette (discontinuité) et ondulée, avec le matériau inférieur.

50 - 100 cm : "Limon" alluvial brun (7,5 YR 4/4 à l'état humide). Homogène. Absence de taches, excepté un mycelium calcaire blanc très fin. Calcaire diffus abondant. Structure polyédrique moyenne anguleuse nette ; très poreux (porosité tubulaire). Friable. Pas d'éléments grossiers. Non salé au goût.

Horizon		DJ 31	DJ 32	DJ 33	
Numéro laboratoire		7	8	9	
Profondeur		cm	0-15	15-50	50-100
Granulométrie	Humidité à pF 4,2	%	3,31	2,44	9,34
	Humidité à pF 2,5	%	6,03	4,49	25,70
	Humidité à pF 2,0	%	8,77	5,54	31,40
	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%	6,20	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )		5,3	5,2	13,1
	Limon fin (2-20 $\mu$ )		1,6	0,6	19,0
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )		3,5	0,9	22,2
	Sable fin (50-200 $\mu$ )		47,7	52,0	34,6
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )		41,9	41,2	11,2
Calcaire total		%	13,0	10,5	13,8
Calcaire actif			1,75	1,31	4,69
Matière organique		%	0,28	0,33	0,48
Carbone total			0,16	0,19	0,28
Azote total		%	0,11	0,12	0,22
C/N			15	16	13
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		ppm	1199	1133	1120
Phosphore assimilable (Olsen)			58	57	51
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	6,53	2,73	12,91
	Mg "		2,01	1,73	4,90
	Na "		0,05	0,01	0,28
	K "		0,43	0,33	0,77
	Somme des bases échangeables		9,02	4,80	18,86
	Capacité d'échange		9,80	7,40	21,30
	Saturation	%	92	65	89
pH (eau)			9,25	9,30	8,75
Bilan ionique : sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		133	135	190
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,15	0,15	0,41
	Ca <sup>++</sup>		0,44	0,44	0,48
	Mg <sup>++</sup>		0,08	0,08	0,14
	K <sup>+</sup>		0,06	0,04	0,05
	Somme des cations		0,73	0,71	1,08
	Cl <sup>-</sup>		0,15	0,04	0,32
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		0,28	0,25	0,22
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,72	0,74	0,82
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,15	1,03	1,36
Bore soluble (1/2)		ppm	0,5	0,5	0,8



Situation : Au centre du périmètre sélectionné.

Unité morphopédologique : Epandages alluviaux sableux actuels des défluent latéraux du cône de l'oued Atar.  
Zone soumise à des inondations dues aux crues des oueds.

Etat de surface : Pente générale de l'ordre de 0,5 %. Végétation d'*Acacia raddiana* et *Balanites aegyptiaca* (buissons de moins de 1 m de haut), assez fournie. Petites nebkas de 50 cm de haut. Fine pellicule squameuse brune, discontinue (décantation de la dernière crue).

Description :

- 0 - 15 cm Couche alluviale très récente. Sables et graviers basaltiques lités. Couleur brun-grisâtre foncé (10 YR 5/2 à l'état humide). Pas de cailloux. Absence de structure. Très friable. Porosité intergranulaire. Présence de calcaire diffus. Limite très nette avec le niveau sous-jacent.
- 15 - 45 cm "Limon" alluvial brun (7,5 YR 4/4 à l'état humide). Homogène, sans taches. mycelium calcaire blanc très fin. Calcaire diffus. Structure polyédrique moyenne. Poreux (pores tubulaires). Friable. Absence d'éléments grossiers. Non salé au goût. Limite très nette avec le niveau inférieur.
- 45 - 60 cm Niveau de sables très grossiers et de gravillons basaltiques. Nette stratification. Couleur. Brun-grisâtre foncé (10 YR 5/2 à l'état humide). Calcaire diffus (pellicule sur les grains basaltiques). Friable. Pas de structure. Limite très nette avec le niveau inférieur.
- 60 - 70 cm Limon brun. Identique au niveau 15-45.
- 70-120 cm Graviers et galets basaltiques (2 à 5 cm de diamètre). Très filtrant. Calcaire diffus.

Horizon		DJ 41	DJ 42	DJ 43	
Numéro laboratoire		10	11	12	
Profondeur		cm	0-15	15-45	45-60
Humidité à pF	4,2	%	4,47	7,53	3,86
	2,5	%	8,84	21,74	5,82
	2,0	%	13,89	25,89	8,60
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%	0	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )		6,8	9,5	6,4
	Limon fin (2-20 $\mu$ )		3,7	19,6	3,4
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )		12,6	19,4	2,6
	Sable fin (50-200 $\mu$ )		48,4	22,0	19,2
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )		28,6	29,4	68,4
Calcaire total		%	13,8	15,4	14,2
Calcaire actif			2,00	5,56	2,25
Matière organique		%	0,26	0,28	0,12
Carbone total			0,15	0,16	0,07
Azote total		%	0,12	0,12	0,10
C/N			13	13	7
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		ppm	1019	1154	1206
Phosphore assimilable (Olsen)			48	41	53
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	5,53	12,01	4,56
	Mg "		2,74	3,77	2,33
	Na "		0,04	0,14	0,07
	K "		0,45	0,83	0,37
	Somme des bases échangeables		8,76	16,75	7,33
	Capacité d'échange		11,50	18,90	10,00
	Saturation	%	76	89	73
pH (eau)			9,25	9,05	9,35
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		132	164	134
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,15	0,39	0,25
	Ca <sup>++</sup>		0,43	0,38	0,36
	Mg <sup>++</sup>		0,09	0,10	0,08
	K <sup>+</sup>		0,04	0,06	0,04
	Somme des cations		0,71	0,93	0,73
	Cl <sup>-</sup>		0,05	0,11	0,03
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		0,25	0,25	0,22
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,71	0,85	0,77
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,01	1,21	1,02
Bore soluble (1/2)		ppm	0,4	0,6	0,5



Situation : A l'extrême aval du périmètre sélectionné, à 850 mètres de la piste.  
Environ 100 mètres à l'extérieur de la limite Nord.

Unité morphopédologique : Alluvions actuelles sableuses des défluent latéraux de l'oued Atar. Zone soumise à des inondations dues aux débordements des axes d'écoulement.

Etat de surface : Pente générale de l'ordre de 0,5 %. Végétation d'*Acacia raddiana* et *Balanites aegyptiaca* (buissons de moins de 1 m de haut, rongés par les chèvres).  
Mesorelief : nebkas et dunes éparées de 1 à 2 mètres de haut. Localement quelques boursouflures salines. Couche limoneuse squameuse de 2 mm d'épaisseur discontinue.

#### Description :

- 0 - 15 cm Couche alluviale très récente. Sables basaltiques et quelques lits de graviers. Nette litation. Brun-grisâtre foncé (10 YR 5/2 humide). Pas de cailloux. Non structuré. Très friable. Porosité intergranulaire. Calcaire diffus. Non salé. Limite très nette avec le matériau sous-jacent.
- 15 - 50 cm Couche limono-sableuse à sablo-limoneuse. Très légèrement prise en masse. Couleur brune (7 YR 4/4 humide). Quelques taches blanches de calcaire. Présence de calcaire diffus. Structure massive. Porosité intergranulaire. Consistance ferme à friable. Non salé au goût. Limite nette avec le niveau inférieur.
- 50 - 60 cm Limon brun (7,5 YR 4/4 humide). Homogène. Sans éléments grossiers. Quelques taches blanches de calcaire. Calcaire diffus bien réparti. Non salé au goût. Structure polyédrique bien développée. Friable. Poreux (pores tubulaires). Limite nette avec l'horizon inférieur.
- 60-100 cm Limon sableux (à sables fins) de couleur brune (7,5 YR 4/4 à l'état humide). Sans taches. Légèrement humide. Présence de petits amas gypseux cristallisés. Calcaire diffus réparti dans tout le matériau. Non structuré. Poreux. Friable. Pas d'éléments grossiers.

Horizon		DJ 51	DJ 52	DJ 53	DJ 54
Numéro laboratoire		13	14	15	16
Profondeur	cm	0-15	15-50	50-60	60-85
Humidité à pF	4,2 %	3,65	10,06	12,85	11,30
Humidité à pF	2,5 %	8,82	29,25	33,25	30,72
Humidité à pF	2,0 %	12,22	32,69	36,81	36,28
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm) %	0	0	0	0
	Argile (0-2μ)	7,1	17,2	16,4	14,3
	Limon fin (2-20μ)	4,0	19,4	23,0	18,5
	Limon grossier (20-50μ)	6,4	22,1	26,4	19,6
	Sable fin (50-200μ)	39,3	32,3	25,7	41,8
	Sable grossier (200-2000μ)	43,2	9,0	8,6	5,8
Calcaire total	%	17,0	13,4	12,6	14,2
Calcaire actif		2,50	4,81	4,75	3,50
Matière organique	%	0,10	0,41	0,45	0,41
Carbone total		0,06	0,24	0,26	0,24
Azote total	%	0,10	0,19	0,18	0,15
C/N		6	13	14	16
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	823	1124	1150	1225
Phosphore assimilable (Olsen)		36	52	59	57
Complexe absorbant	*Ca échangeable mé%	4,47	6,28	7,70	10,09
	Mg "	2,41	4,49	5,40	5,41
	Na "	0,08	4,29	3,26	2,36
	K "	0,43	0,82	0,82	0,56
	Somme des bases échangeables	7,39	15,88	17,18	18,42
	Capacité d'échange	8,50	19,80	21,20	23,80
	Saturation %	87	80	81	77
pH (eau)		9,10	9,20	9,00	8,65
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) μmhos/cm	228	998	1150	2490
	Na <sup>+</sup> mé%	0,71	5,11	6,04	11,74
	Ca <sup>++</sup>	0,39	0,13	0,19	1,13
	Mg <sup>++</sup>	0,10	0,06	0,10	0,34
	K <sup>+</sup>	0,06	0,05	0,05	0,09
	Somme des cations	1,26	5,35	6,38	13,30
	Cl <sup>-</sup>	0,46	3,38	4,79	9,15
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,22	1,09	0,78	3,19
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,80	1,11	0,97	0,77
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0	0	0	0
	Somme des anions	1,48	5,58	6,54	13,11
Bore soluble (1/2) ppm		0,5	9,4	6,8	10,8



**Situation** Rive droite de l'oued Atar, à proximité de son débouché dans la plaine cotière. A environ 200 mètres NNE du forage E 24.

**Unité morphopédologique** : Cône "ancien" (holocène) de l'oued Atar. Alluvions limoneuses

**Etat de surface** : Pente 0,5 à 1 %. Pavage caillouteux très irrégulier. A proximité, présence de quelques boursouflures de sel.

**Description :**

0 - 20 cm Recouvrement sableux récent (sables basaltiques), couche de transit colluvial (ruissellement en nappe). Brun (10 YR 4/4 à l'état humide). Lits de sables grossiers et de petits gravillons. Absence de cailloux. Très friable. Poreux. Non salé. Présence de calcaire diffus. Limite très nette (discontinuité) avec le niveau inférieur.

20 - 80 cm Matériau alluvial très limoneux (cône ancien), homogène. Couleur brune (7,5 YR 5/4 humide). Structure polyédrique moyenne anguleuse. Pas de fentes. Massif. Assez compact. Porosité tubulaire fine. Calcaire diffus abondant. Quelques amas calcaires friables. Non salé au goût.

Horizon		DJ 61	DJ 62	DJ 63	
Numéro laboratoire		17	18	19	
Profondeur		0-20	20-40	40-80	
		cm			
Humidité à pF 4,2		%			
Humidité à pF 2,5		%			
Humidité à pF 2,0		%			
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%	0	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )		3,1	2,9	2,7
	Limon fin (2-20 $\mu$ )		4,7	28,8	21,5
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )		8,8	28,9	25,4
	Sable fin (50-200 $\mu$ )		36,6	24,1	30,2
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )		46,7	15,3	20,2
Calcaire total		%	16,6	24,3	20,7
Calcaire actif			2,62	7,75	5,06
Matière organique		%	0,22	0,40	0,38
Carbone total			0,13	0,23	0,22
Azote total		%	0,13	0,13	0,12
C/N			10	18	18
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		ppm	1015	955	1013
Phosphore assimilable (Olsen)			57	27	28
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	7,43	15,70	10,83
	Mg	"	2,59	5,86	5,91
	Na	"	0,21	0,43	2,58
	K	"	0,60	0,53	0,33
	Somme des bases échangeables		10,83	22,52	19,65
	Capacité d'échange		13,50	26,70	24,20
	Saturation	%	80	84	81
pH (eau)			9,35	8,30	9,60
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		160	912	281
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,45	2,96	1,52
	Ca <sup>++</sup>		0,30	1,55	0,08
	Mg <sup>++</sup>		0,07	0,28	0,03
	K <sup>+</sup>		0,06	0,04	0,01
	Somme des cations		0,89	4,83	1,64
	Cl <sup>-</sup>		0,09	3,62	0,17
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		0,22	0,58	0,39
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,78	0,67	1,32
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,09	4,87	1,88
Bore soluble (1/2)		ppm	/	/	/



Horizon		DB 11	DB 12	DB 13	
Numéro laboratoire		20	21	22	
Profondeur	cm	0-10	10-50	50-100	
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%			
	Argile (0-2 $\mu$ )		51,9	43,9	
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	3,4	15,1	6,7	
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	3,1	10,1	8,3	
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	5,2	5,0	5,1	
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	39,2	17,0	20,4	
Calcaire total		49,0	52,9	59,4	
Calcaire actif		%			
Matière organique		2,8	5,3	9,3	
Carbone total		0,94	2,75	3,63	
Azote total		%			
C/N		0,24	0,47	0,17	
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		0,14	0,27	0,10	
Phosphore assimilable (Olsen)		%			
pH (eau)		0,08	0,18	0,10	
pH (eau)		18	15	10	
Complexe absorbant	*Ca échangeable	ppm	659	632	694
	Mg		56	34	36
	Na	mé%	3,72	13,98	9,33
	K		1,41	2,48	2,23
	Somme des bases échangeables		0,19	0,17	0,19
	Capacité d'échange		0,71	0,88	0,53
Saturation		%	6,03	17,51	12,28
pH (eau)			10,60	21,10	16,20
pH (eau)			57	83	76
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		9,20	8,65	8,65
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,21	0,24	0,35
	Ca <sup>++</sup>		0,35	0,54	0,63
	Mg <sup>++</sup>		0,06	0,09	0,10
	K <sup>+</sup>		0,09	0,05	0,04
	Somme des cations		0,71	0,92	1,12
	Cl <sup>-</sup>		0,04	0,12	0,28
	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>		0,30	0,31	0,28
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,73	0,73	0,81
	CO <sub>3</sub> <sup>---</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,07	1,16	1,37
Bore soluble (1/2)		ppm			

Horizon		DB 21	DB 22	DB 23	DB 24
Numéro laboratoire		23	24	25	26
Profondeur	cm	0-3	3-30	30-60	60-100
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	%			
	Argile (0-2 $\mu$ )		8,8	0	47,3
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	3,8	12,8	16,0	15,9
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	4,4	10,9	15,7	15,0
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	4,9	7,7	8,3	6,9
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	33,5	22,3	20,9	23,2
Calcaire total		53,4	46,4	39,1	38,9
Calcaire actif		%			
Matière organique		1,6	1,9	3,2	5,7
Carbone total		0,88	1,63	2,50	3,81
Azote total		%			
C/N		0,17	0,26	0,40	0,26
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		0,10	0,15	0,23	0,15
Phosphore assimilable (Olsen)		%			
pH (eau)		0,08	0,16	0,14	0,10
pH (eau)		13	10	16	15
Complexe absorbant	*Ca échangeable	ppm	624	535	606
	Mg		48	21	18
	Na	mé%	4,06	12,15	15,58
	K		1,59	2,33	2,96
	Somme des bases échangeables		0,03	0,33	0,37
	Capacité d'échange		0,77	0,73	0,56
Saturation		%	6,45	15,54	19,47
pH (eau)			10,60	20,50	26,00
pH (eau)			61	76	75
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm		9,25	8,35	8,85
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,20	0,41	0,39
	Ca <sup>++</sup>		0,31	1,27	0,40
	Mg <sup>++</sup>		0,08	0,15	0,07
	K <sup>+</sup>		0,09	0,05	0,02
	Somme des cations		0,68	1,88	0,89
	Cl <sup>-</sup>		0,66	0,25	0,10
	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>		0,22	1,00	0,31
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,67	0,64	0,82
	CO <sub>3</sub> <sup>---</sup>		0	0	0
	Somme des anions		0,95	1,89	1,23
Bore soluble (1/2)		ppm	/	/	/



Horizon		GB 11	GB 12	GB 13	GB 14
Numéro laboratoire		27	28	29	30
Profondeur	cm	0-5	5-20	20-50	50-100
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )	3,4	6,4	10,3	15,8
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	4,7	8,0	19,9	19,6
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	13,9	8,9	9,3	5,4
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	55,3	28,1	16,4	16,9
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	22,8	48,6	44,1	42,3
Calcaire total	%	4,1	5,7	7,3	15,4
Calcaire actif		1,38	1,38	3,25	3,44
Matière organique	%	0,26	0,22	0,50	0,45
Carbone total		0,15	0,13	0,29	0,26
Azote total	%	0,17	0,10	0,20	0,18
C/N		9	13	15	14
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	720	629	494	302
Phosphore assimilable (Olsen)		55	61	37	10
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé% 7,50	7,21	13,38	9,07
	Mg "	2,25	2,62	3,90	6,45
	Na "	0,18	0,46	0,48	1,26
	K "	0,70	0,65	0,73	0,55
	Somme des bases échangeables	10,63	10,94	18,49	17,33
	Capacité d'échange	14,30	14,90	21,70	21,70
	Saturation	% 74	73	85	80
pH (eau)		9,20	9,05	8,90	8,70
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ hos/cm	126	155	235	849
	Na <sup>+</sup>	mé% 0,21	0,41	0,93	3,13
	Ca <sup>++</sup>	0,33	0,34	0,25	0,34
	Mg <sup>++</sup>	0,08	0,07	0,06	0,14
	K <sup>+</sup>	0,06	0,04	0,03	0,04
	Somme des cations	0,68	0,86	1,27	3,65
	Cl <sup>-</sup>	0,05	0,20	0,33	2,24
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,22	0,28	0,29	0,32
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,71	0,75	0,86	0,78
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0	0	0	0
	Somme des anions	0,98	1,23	1,48	3,34
Bore soluble (1/2)	ppm	/	/	/	/

Horizon		GB 21	GB 22	GB 23	
Numéro laboratoire		31	32	33	
Profondeur	cm	2-15	15-30	30-60	
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	
	Argile (0-2 $\mu$ )	19,5	15,7	19,2	
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	17,6	15,4	22,1	
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	5,3	4,9	5,3	
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	16,0	12,7	12,9	
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	41,7	51,2	40,4	
Calcaire total	%	13,0	14,2	19,5	
Calcaire actif		5,06	4,31	4,31	
Matière organique	%	0,71	0,60	0,59	
Carbone total		0,41	0,35	0,34	
Azote total	%	0,23	0,23	0,18	
C/N		18	15	19	
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	559	538	323	
Phosphore assimilable (Olsen)		35	29	15	
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé% 10,02	7,24	12,07	
	Mg "	4,03	4,14	5,08	
	Na "	1,83	2,93	0,30	
	K "	0,69	0,53	0,49	
	Somme des bases échangeables	16,57	14,84	17,94	
	Capacité d'échange	21,30	19,40	19,30	
	Saturation	% 78	76	93	
pH (eau)		9,65	9,35	8,40	
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ hos/cm	224	430	2340	
	Na <sup>+</sup>	mé% 1,36	2,26	9,35	
	Ca <sup>++</sup>	0,18	0,10	3,63	
	Mg <sup>++</sup>	0,03	0,02	0,71	
	K <sup>+</sup>	0,03	0,02	0,06	
	Somme des cations	1,60	2,40	13,75	
	Cl <sup>-</sup>	0,17	1,15	8,24	
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,28	0,32	6,00	
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,42	1,20	0,51	
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0	0	0	
	Somme des anions	1,87	2,67	14,74	
Bore soluble (1/2)	ppm	/	/	/	



Horizon		GB 31	GB 32	GB 33	GB 34
Numéro laboratoire		34	35	36	37
Profondeur	cm	0-8	8-40	40-65	65-100
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	16,5	0	0
	Argile (0-2 $\mu$ )	4,5	25,7	31,0	32,2
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	4,5	27,3	24,1	24,3
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	9,6	7,8	5,9	7,8
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	40,9	15,4	13,4	14,2
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	40,5	23,7	25,0	21,5
Calcaire total	%	13,0	15,4	16,6	21,0
Calcaire actif		1,38	4,31	4,38	6,94
Matière organique	%	0,52	0,41	0,88	0,76
Carbone total		0,30	0,24	0,51	0,44
Azote total	‰	0,24	0,14	0,38	0,26
C/N		12	17	13	17
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	658	645	737	707
Phosphore assimilable (Olsen)		51	35	40	45
Complexe absorbant	*Ca échangeable	6,89	13,62	17,41	17,39
	Mg "	2,48	6,13	8,78	9,93
	Na "	0,52	3,22	0,81	0,85
	K "	0,66	0,77	0,73	0,69
	Somme des bases échangeables	10,55	23,74	27,73	28,86
	Capacité d'échange	14,50	28,10	29,90	29,70
	Saturation	73	84	93	97
pH (eau)		9,60	8,55	8,20	8,15
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	167	1470	3750	4100
	Na <sup>+</sup>	0,74	7,17	15,49	16,30
	Ca <sup>++</sup>	0,14	0,50	4,69	4,84
	Mg <sup>++</sup>	0,03	0,12	1,22	1,47
	K <sup>+</sup>	0,03	0,04	0,07	0,08
	Somme des cations	0,95	7,83	21,47	22,69
	Cl <sup>-</sup>	0,17	5,92	16,55	18,13
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,22	0,61	2,95	2,33
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,81	0,71	0,45	0,42
	CO <sub>3</sub> <sup>---</sup>	0	0	0	0
	Somme des anions	1,20	7,24	19,95	20,88
Bore soluble (1/2)	ppm	/	/	/	/



Horizon		MD 11	MD 12	MD 13	MD 14
Numéro laboratoire		38	39	40	41
Profondeur	cm	0-8	8-25	25-80	80-100
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	37,2
	Argile (0-2 $\mu$ )	4,3	14,2	25,9	13,1
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	4,3	6,6	13,1	15,0
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	4,7	5,6	6,9	9,0
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	26,0	19,3	16,1	21,0
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	60,7	54,4	37,9	42,8
Calcaire total	%	2,4	3,2	4,4	11,3
Calcaire actif		1,13	2,13	3,13	5,70
Matière organique	%	0,45	0,41	0,48	0,26
Carbone total		0,26	0,24	0,28	0,15
Azote total	‰	0,23	0,17	0,23	0,10
C/N		11	14	12	15
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	747	716	662	738
Phosphore assimilable (Olsen)		44	40	39	48
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé% 6,16	13,10	21,88	12,45
	Mg	1,35	1,88	3,19	2,81
	Na	0,13	0,12	0,41	0,62
	K	0,73	0,84	0,74	0,58
	Somme des bases échangeables	8,37	15,94	26,22	16,46
	Capacité d'échange	12,90	22,60	33,80	22,60
	Saturation	% 65	71	78	73
pH (eau)		9,20	9,00	8,30	9,20
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	127	132	515	198
	Na <sup>+</sup>	mé% 0,15	0,26	1,11	0,80
	Ca <sup>++</sup>	0,39	0,34	1,68	0,26
	Mg <sup>++</sup>	0,06	0,05	0,15	0,04
	K <sup>+</sup>	0,06	0,04	0,06	0,03
	Somme des cations	0,66	0,69	3,00	1,13
	Cl <sup>-</sup>	0,06	0,06	0,67	0,17
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,28	0,28	1,70	0,32
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,66	0,66	0,56	0,89
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0	0	0	0
	Somme des anions	1,00	1,00	2,93	1,38
Bore soluble (1/2)	ppm	/	/	/	/

Horizon		MD 21	MD 22	MD 23	MD 24
Numéro laboratoire		42	43	44	45
Profondeur	cm	0-15	15-40	40-70	70-100
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	33,3
	Argile (0-2 $\mu$ )	4,1	15,2	23,6	12,3
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	3,5	4,6	13,5	14,8
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	4,6	5,6	5,9	8,6
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	36,0	22,5	16,0	20,0
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	51,8	52,2	41,0	44,3
Calcaire total	%	2,0	2,8	4,0	11,3
Calcaire actif		1,13	1,63	3,38	5,44
Matière organique	%	0,24	0,22	0,81	0,67
Carbone total		0,14	0,13	0,47	0,39
Azote total	‰	0,09	0,09	0,35	0,28
C/N		16	14	13	14
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )	ppm	809	709	702	735
Phosphore assimilable (Olsen)		55	36	29	40
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé% 5,33	13,53	19,52	13,31
	Mg	1,24	1,65	2,28	2,53
	Na	0,01	0,11	0,39	0,77
	K	0,74	0,83	0,75	0,58
	Somme des bases échangeables	7,32	16,12	22,94	17,19
	Capacité d'échange	11,60	22,70	32,70	23,20
	Saturation	% 63	71	70	74
pH (eau)		9,15	8,80	8,75	9,20
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	128	135	164	175
	Na <sup>+</sup>	mé% 0,15	0,26	0,48	0,77
	Ca <sup>++</sup>	0,38	0,36	0,34	0,20
	Mg <sup>++</sup>	0,05	0,04	0,04	0,03
	K <sup>+</sup>	0,07	0,04	0,03	0,02
	Somme des cations	0,65	0,70	0,89	1,03
	Cl <sup>-</sup>	0,06	0,06	0,08	0,06
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,28	0,28	0,29	0,29
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,64	0,57	0,72	0,91
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0	0	0	0
	Somme des anions	0,98	0,91	1,09	1,26
Bore soluble (1/2)	ppm	/	/	/	/



Horizon		SB 11	SB 12	SB 13	
Numéro laboratoire		46	47	48	
Profondeur	cm	0-8	8-30	30-80	
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	
	Argile (0-2 $\mu$ )	6,5	35,5	35,9	
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	3,4	27,9	32,3	
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	3,6	10,0	13,5	
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	16,4	5,2	5,1	
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	70,1	21,4	13,2	
Calcaire total		4,8	14,9	12,9	
Calcaire actif		1,31	6,00	6,25	
Matière organique		0,26	0,50	0,60	
Carbone total		0,15	0,29	0,35	
Azote total		0,10	0,20	0,20	
C/N		15	15	18	
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		243	948	992	
Phosphore assimilable (Olsen)		38	43	39	
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	3,44	17,98	37,98
	Mg	"	2,30	7,63	10,82
	Na	"	0,01	1,62	0,10
	K	"	0,38	0,84	0,73
	Somme des bases échangeables		6,13	28,07	49,63
	Capacité d'échange		9,20	18,07	30,40
	Saturation	%	67	/	/
pH (eau)		9,30	8,30	8,25	
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	159	2150	5250	
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,28	9,78	17,39
	Ca <sup>++</sup>		0,43	1,26	18,13
	Mg <sup>++</sup>		0,08	0,35	3,87
	K <sup>+</sup>		0,06	0,07	0,21
	Somme des cations		0,85	11,46	39,58
	Cl <sup>-</sup>		0,06	10,00	13,17
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		0,29	0,61	21,68
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,74	0,67	0,53
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,09	11,28	35,38
Bore soluble (1/2)		ppm	/	/	/

\* Méthode Hissinck

Horizon		SB 21	SB 22	SB 23	
Numéro laboratoire		49	50	51	
Profondeur	cm	0-20	20-50	50-75	
Humidité à pF 4,2	%				
Humidité à pF 2,5	%				
Humidité à pF 2,0	%				
Granulométrie	Eléments grossiers (refus 2 mm)	0	0	0	
	Argile (0-2 $\mu$ )	3,4			
	Limon fin (2-20 $\mu$ )	0,9			
	Limon grossier (20-50 $\mu$ )	2,3			
	Sable fin (50-200 $\mu$ )	16,0			
	Sable grossier (200-2000 $\mu$ )	77,4			
Calcaire total		4,0	21,6	17,5	
Calcaire actif		0,94	15,13	12,13	
Matière organique		0,12	0,83	1,17	
Carbone total		0,07	0,48	0,68	
Azote total		0,05	0,41	0,52	
C/N		14	12	13	
Phosphore total (extraction HNO <sub>3</sub> )		268	756	806	
Phosphore assimilable (Olsen)		33	65	68	
Complexe absorbant	*Ca échangeable	mé%	1,63	29,34	28,31
	Mg	"	1,68	5,81	6,19
	Na	"	0,03	0,10	0,30
	K	"	0,14	0,50	0,45
	Somme des bases échangeables		3,48	35,75	35,25
	Capacité d'échange		5,20	19,00	33,60
	Saturation	%	67	/	/
pH (eau)		8,90	8,25	8,10	
Bilan ionique - sels solubles	Conductivité (extrait 1/5) $\mu$ mhos/cm	180		8100	
	Na <sup>+</sup>	mé%	0,17	17,39	33,70
	Ca <sup>++</sup>		0,75	15,31	20,31
	Mg <sup>++</sup>		0,10	0,64	1,18
	K <sup>+</sup>		0,04	0,11	0,26
	Somme des cations		1,06	33,45	55,45
	Cl <sup>-</sup>		0,06	11,48	32,57
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		0,27	20,70	21,09
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,68	0,56	0,52
	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>		0	0	0
	Somme des anions		1,01	32,74	54,18
Bore soluble (1/2)		ppm	/	/	/

\* Méthode Hissinck